



SIMMER-III/IVのための多ノード集合体 管壁モデルの開発

Development of Multi-Node Can Wall Model for SIMMER-III/IV

山野 秀将 近藤 哲平 菅谷 正昭 神山 健司

Hidemasa YAMANO, Teppei KONDO,
Masa-aki SUGAYA and Kenji KAMIYAMA

次世代原子力システム研究開発部門

FBR設計グループ

FBR System Design Group

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

June 2007

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel.029-282-6387, Fax029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.

Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department,

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel.029-282-6387, Fax029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2007

SIMMER-III/IV のための多ノード集合体管壁モデルの開発

日本原子力研究開発機構
次世代原子力システム研究開発部門 設計統括ユニット

山野 秀将、近藤 哲平[※]、菅谷 正昭[※]、神山 健司⁺

(2007 年 5 月 7 日受理)

SIMMER-III コードおよびその 3 次元版 SIMMER-IV は、液体金属冷却高速炉の炉心損傷事故の影響を評価するために開発されてきた。本研究では、同コードを構成する構造材場モデルの集合体管壁モデルの管壁内部を従来の 2 ノードから多ノード化に拡張した。開発したモデルは手動でノード数を与えることもできるが、自動的にノード数を割り当てるようにモデル化された。本モデルは核加熱や軸方向熱伝達に対しても対応できる。本モデルは基礎的な検証問題でモデルの妥当性を確認した。本モデルによって、従来モデルの限界が解消され、高速炉の安全解析の信頼性および精度が向上するとともに、再臨界排除概念設計研究に対する寄与が期待される。

大洗研究開発センター（駐在）：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

※ 業務協力員（(株) NESI）

+ FBR システムユニット

Development of Multi-Node Can Wall Model for SIMMER-III/IV

Hidemasa YAMANO, Teppei KONDO[※], Masa-aki SUGAYA[※] and Kenji KAMIYAMA⁺

FBR Cycle System Design Synthesis Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 7, 2007)

The SIMMER-III code and its three-dimensional code SIMMER-IV have been developed to evaluate the consequence of core disruptive accidents in liquid-metal cooled fast reactors. The present study has extended the number of nodes in a structure model of SIMMER code from a conventional fixed two-node model to a multi-node model. The number of nodes can be specified automatically or manually. The model also treats the effect of nuclear heating and axial heat transfer. The model was validated by basic verification calculations. The model alleviates the limitation of conventional model significantly as well as improves the reliability and accuracy of fast reactor safety analyses. This study is expected to contribute to the design study of recriticality-free concept.

Keywords: Liquid-metal Fast Reactor (LMFR), Core Disruptive Accident (CDA), Recriticality, Heat Transfer

※ Cooperative Staff (NESI Inc.)

+ FBR System Engineering Unit

目次

1	序論	1
2	構造材場モデルの概要	2
2.1	モデル概要および基本的仮定	2
2.1.1	SIMMER-III/IV における成分	2
2.1.2	集合体管壁	2
2.2	多ノード集合体管壁モデルの有益性	3
3	幾何形状および初期化	4
3.1	集合体管壁の幾何形状	4
3.2	入力データおよび初期化	4
3.2.1	熱透過距離の計算	4
3.2.2	集合体管壁の初期化	5
3.2.3	厚い管壁の内部ノードの多ノード化	6
4	構造材配位モデル	8
4.1	構造材配位モデルの概要	8
4.2	集合体管壁構造の配位	9
4.2.1	径方向第 1 実セルの左側境界 ($i = 1$)	9
4.2.2	径方向最終実セルの右側境界 ($i = IB$)	9
4.2.3	通常の実セル境界 ($2 \leq i \leq IB - 1$)	9
4.3	集合体管壁の厚み	10
4.4	集合体管壁内ノードの厚みと数	10
4.5	径方向第 1 実セルの左側境界の管壁の計算	11
4.5.1	ケース 1 (管壁が薄い場合)	11
4.5.2	ケース 2 (管壁が厚い場合)	13
4.5.3	ケース 2' (管壁が厚い場合で、内部ノードを多ノード化する場合)	15
4.6	径方向最終実セルの右側境界の管壁の計算	17
4.7	通常の実セルの境界の管壁の計算	17
4.7.1	ケース 8a (管壁が薄く、クラストが存在しない場合)	18
4.7.2	ケース 8b (管壁が薄く、クラストが存在する場合)	20
4.7.3	ケース 8c (管壁が厚く、クラストが存在しない場合)	22
4.7.4	ケース 8c' (厚い管壁を多ノード化する場合)	25
4.7.5	ケース 8d (管壁が厚く、クラストが存在する場合)	28
4.8	構造材の体積率	29
4.9	水力等価直径	30

5	集合体管壁の熱伝達モデル	32
5.1	全体概要	32
5.2	単独の管壁	32
5.2.1	ケース 1 (クラストの無い厚い管壁)	32
5.2.2	ケース 2 (クラストの有る薄い管壁)	32
5.2.3	ケース 3 (クラストの有る厚い管壁)	33
5.2.4	ケース 4 (厚い管壁を多ノード化する場合)	33
5.2.5	計算方法	33
5.3	隣接セルと結合された薄い管壁 (クラストあり)	35
5.3.1	ケース 1 (隣接セルにクラストが無い場合)	35
5.3.2	ケース 2 (隣接セルにクラストが有り、自己セルに無い場合)	35
5.3.3	ケース 3 (隣接セルと自己セルにクラストが有る場合)	35
5.3.4	計算方法	35
5.4	隣接セルと結合された厚い管壁 (クラスト有りまたは無し)	35
5.4.1	ケース 1 (クラストが無い場合)	35
5.4.2	ケース 2 (隣接セルにのみクラストが有る場合)	36
5.4.3	ケース 3 (自己セルにのみクラストが有る場合)	36
5.4.4	ケース 4 (隣接セルと自己セルにクラストが有る場合)	37
5.4.5	計算方法	37
5.5	核加熱の取り扱い	38
5.6	軸方向熱伝達の取り扱い	38
6	集合体管壁の質量移行モデル	39
6.1	全体概要	39
6.2	平衡溶融／固化による質量移行	39
6.2.1	クラスト燃料の平衡溶融	39
6.2.2	集合体管壁の平衡溶融	40
6.2.3	燃料粒子、チャンク燃料およびスチール粒子の平衡溶融	40
6.2.4	固体の溶融による液体場の状態変化	41
6.2.5	液体燃料の平衡固化	42
6.2.6	液体スチールの平衡固化	42
6.2.7	液体場燃料からの FP ガス放出	44
6.3	集合体管壁およびクラスト燃料の破損	45
6.3.1	集合体管壁の破損	45
6.3.2	クラスト燃料の破損	46
7	多ノード集合体管壁モデルの検証	48
7.1	簡易熱伝導問題	48

7.2	液体スチール固化問題	48
7.3	スチール壁溶融問題	48
7.4	燃料クラスト形成問題	49
8	結論	50
	参考文献	51
	記号表	52
付録 A	様々な構造材配位パターンに対する基礎的検証	66

Contents

1	Introduction	1
2	Overview of the structure model	2
2.1	Overview of the model and basic assumptions	2
2.1.1	SIMMER-III/IV components	2
2.1.2	Can wall	2
2.2	Effectiveness of multi-node can wall model	3
3	Geometry and initialization	4
3.1	Can wall geometry	4
3.2	Input data and initialization	4
3.2.1	Thermal penetration lengths	4
3.2.2	Can wall initialization	5
3.2.3	Multi-node extension of a can wall interior of a thick can wall	6
4	Structure configuration model	8
4.1	Overview of the structure configuration model	8
4.2	Can wall configuration cases	9
4.2.1	Can wall configurations for the left boundary of the first radial real cell	9
4.2.2	Can wall configurations for the right boundary of the last radial real cell	9
4.2.3	Can wall configurations for the boundary of the normal real cell	9
4.3	Can wall thickness	10
4.4	Thickness and number of a can wall interior	10
4.5	Can wall for the left boundary of the first radial real cell	11
4.5.1	Case 1 (thin can wall)	11
4.5.2	Case 2 (thick can wall)	13
4.5.3	Case 2' (thick can wall and its multi-node extension)	15
4.6	Can wall for the right boundary of the last radial real cell	17
4.7	Can wall for the boundary of the normal real cell	17
4.7.1	Case 8a (thin can wall without crust)	18
4.7.2	Case 8b (thin can wall with crust)	20
4.7.3	Case 8c (thick can wall without crust)	22
4.7.4	Case 8c' (thick can wall without crust and its multi-node extension)	25
4.7.5	Case 8d (thick can wall with crust)	28
4.8	Structure volume fraction	29
4.9	Hydraulic diameter	30

5	Can wall heat transfer model	32
5.1	Overview of the heat transfer model	32
5.2	Isolated can wall	32
5.2.1	Case 1 (thick can wall without crust)	32
5.2.2	Case 2 (thin can wall with crust)	32
5.2.3	Case 3 (thick can wall with crust)	33
5.2.4	Case 4 (thick can wall and its multi-node extension)	33
5.2.5	Solution procedure	33
5.3	Thin can wall contacting an adjacent cell (with crust)	35
5.3.1	Case 1 (crust in the cell)	35
5.3.2	Case 2 (crust in the adjacent cell)	35
5.3.3	Case 3 (crust in both the cells)	35
5.3.4	Solution procedure	35
5.4	Thick can wall contacting an adjacent cell	35
5.4.1	Case 1 (without crust)	35
5.4.2	Case 2 (crust in the adjacent cell)	36
5.4.3	Case 3 (crust in the cell)	36
5.4.4	Case 4 (crust in both the cells)	37
5.4.5	Solution procedure	37
5.5	Adaptation to nuclear heating	38
5.6	Adaptation to axial heat transfer	38
6	Can wall mass transfer model	39
6.1	Overview	39
6.2	Mass transfer by equilibrium melting and freezing	39
6.2.1	Equilibrium melting of crust fuel	39
6.2.2	Equilibrium melting of can wall	40
6.2.3	Equilibrium melting of fuel particles, steel particles and fuel chunks	40
6.2.4	Update of liquid state as resulted from equilibrium melting	41
6.2.5	Equilibrium freezing of liquid fuel	42
6.2.6	Equilibrium freezing of liquid steel	42
6.2.7	Fission gas release from liquid field components	44
6.3	Breakup of can wall and fuel crust	45
6.3.1	Can wall breakup	45
6.3.2	Fuel crust breakup	46
7	Verification of multi-node can wall model	48
7.1	Simple heat conduction problem	48

7.2	Liquid steel freezing problem	48
7.3	Can wall melting problem	48
7.4	Fuel crust formation problem	49
8	Conclusion	50
	References	51
	Nomenclature	52
	Appendix A Basic verification for various can wall configuration pattern	66

図表一覧

表 1 : SIMMER-III 流体力学部構造材場成分	54
表 2 : SIMMER-IV 流体力学部構造材場成分	54
表 3 : SIMMER-III/IV 流体力学部液体場成分	55
表 4 : SIMMER-III/IV 流体力学部蒸気場成分	55
図 1 : SIMMER-III/IV コードの全体構造	56
図 2 : 計算メッシュセル内の燃料ピンおよび集合体管壁配位	56
図 3 : 集合体管壁の配位（右側セル境界に対する例）	57
図 4 : 厚い集合体管壁に対する従来の 2 ノードモデルの欠点	58
図 5 : マルチノードモデルの概念	58
図 6 : 円筒体系における管壁のノード境界および温度点の各半径	59
図 7 : 簡易熱伝導問題のための解析体系	60
図 8 : 計算された壁内温度分布	60
図 9 : 計算されたクラスト温度の短期挙動	61
図 10 : 計算されたクラスト温度の長期挙動	61
図 11 : スティール固化問題の解析体系	62
図 12 : スティール固化問題の解析結果	62
図 13 : スティール壁溶融問題の解析体系	63
図 14 : スティール壁溶融問題の解析結果	63
図 15 : 燃料クラスト形成問題の解析体系	64
図 16 : 燃料クラスト形成問題のために計算されたクラスト厚み	64
図 17 : 燃料クラスト形成問題のために計算された壁内温度	65
図 18 : 燃料クラスト形成問題のために計算された溶融スティール体積率	65

List of Tables and Figures

Table 1: SIMMER-III Fluid Dynamics Structure Field Components.	54
Table 2: SIMMER-IV Fluid Dynamics Structure Field Components.	54
Table 3: SIMMER-III/IV Fluid Dynamics Liquid Field Components.	55
Table 4: SIMMER-III/IV Fluid Dynamics Vapor Field Components.	55
Fig. 1: SIMMER-III/IV overall code structure.	56
Fig. 2: Fuel Pin and Can Wall Configuration in a Mesh Cell.	56
Fig. 3: Can-Wall Configurations (Examples for right cell boundary).	57
Fig. 4: Shortcoming of original two-node model for thick can wall.	58
Fig. 5: Concept of multi-node model.	58
Fig. 6: Each Radius of Node Boundaries and Temperature Points for Can Wall in the Cylindrical Geometry.	59
Fig. 7: Analytical geometry for simple heat conduction problem.	60
Fig. 8: Calculated temperature distributions inside the wall.	60
Fig. 9: Short-term behavior of calculated crust temperature.	61
Fig. 10: Long-term behavior of calculated crust temperature.	61
Fig. 11: Analytical geometry for steel solidification problem.	62
Fig. 12: Calculated result for steel solidification problem.	62
Fig. 13: Analytical geometry for steel can-wall melting problem.	63
Fig. 14: Calculated result for steel can-wall melting problem.	63
Fig. 15: Analytical geometry for fuel-crust formation problem.	64
Fig. 16: Calculated crust thickness for fuel-crust formation problem.	64
Fig. 17: Calculated wall temperatures for fuel-crust formation problem.	65
Fig. 18: Calculated steel-melt volume fraction for fuel-crust formation problem.	65
Fig. A-1: Crust surrounding thick left can wall coupling with thick right can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC1).	66
Fig. A-2: Thick left can wall coupling with adjacent thick right can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC2).	67
Fig. A-3: Crust surrounding thick left can wall coupling with right crust in the adjacent cell using slab geometry (NC4).	68
Fig. A-4: Crust surrounding thick left can wall coupling with no thick right can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC5).	69
Fig. A-5: Thick left can wall coupling with right crust in the adjacent cell using slab geometry (NC6).	70
Fig. A-6: Thick left can wall coupling with no thick right can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC7).	71
Fig. A-7: Crust surrounding thick right can wall coupling with thick left can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC1).	72
Fig. A-8: Thick right can wall coupling with thick left can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC2).	73

Fig. A-9: Crust surrounding thick right can wall coupling with left crust in the adjacent cell using slab geometry (NC4).	74
Fig. A-10: Crust surrounding thick right can wall coupling with no thick left can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC5).	75
Fig. A-11: Thick right can wall coupling with left crust in the adjacent cell using slab geometry (NC6).	76
Fig. A-12: Thick right can wall coupling with no thick left can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC7).	77
Fig. A-13: Crust surrounding thick left can wall coupling with thick right can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC1).	78
Fig. A-14: Thick left can wall coupling with adjacent thick right can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC2).	79
Fig. A-15: Crust surrounding thick left can wall coupling with right crust in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC4).	80
Fig. A-16: Crust surrounding thick left can wall coupling with no thick right can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC5).	81
Fig. A-17: Thick left can wall coupling with right crust in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC6).	82
Fig. A-18: Thick left can wall coupling with no thick right can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC7).	83
Fig. A-19: Crust surrounding thick right can wall coupling with thick left can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC1).	84
Fig. A-20: Thick right can wall coupling with thick left can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC2).	85
Fig. A-21: Crust surrounding thick right can wall coupling with left crust in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC4).	86
Fig. A-22: Crust surrounding thick right can wall coupling with no thick left can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC5).	87
Fig. A-23: Thick right can wall coupling with left crust in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC6).	88
Fig. A-24: Thick right can wall coupling with no thick left can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC7).	89

1 序論

液体金属冷却高速炉（LMFR: liquid-metal fast reactor）では、炉心損傷事故（CDA: core disruptive accident）は技術的に起るとは考えられないほどに十分に発生確率は低いと考えられるが、その事故影響の重要性と公衆への安心感の観点から、CDA における事象推移に関する研究が行われてきた。この CDA 研究の一環として、日本原子力研究開発機構では 1980 年後半から CDA シナリオ評価研究のためのシミュレーションコード SIMMER-III^{1) 2)}を開発してきた。

SIMMER-III コード開発計画では、1996 年までに個別要素モデルの検証を目的とした第 1 期検証計画³⁾、2000 年までに実機評価上重要な現象に着目した第 2 期検証計画⁴⁾が実施され、当初予定していた物理モデルの構築は完了した。この検証計画の中では、要素モデルの拡張の必要性なども議論され、現在においてもモデル開発・検証は継続している。また、3 次元コード⁵⁾への拡張も行われている。

さて、SIMMER-III のコード全体構成を図 1 に示す。コード全体は大きく分けて、流体力学計算部、構造材計算部、核計算部の 3 つの部分から構成され、これらの間で必要な情報を適宜交換することにより有機的に結合している。SIMMER-III における構造材場とは、流体力学的には静止した固体成分である燃料ピンおよび集合体管壁（ラップ管）とからなり、流体の流動に対する境界条件を与える。SIMMER-III における構造材計算部と流体力学部の結合を複雑としている要因は、この流路壁である構造材場が定常的に存在し続けるのではなく、流体場との熱および質量交換を通じて常に動的に変化するということである。現在、当初予定していた構造材場モデル開発は終了し、モデル化に関する報告書は既に作成された⁶⁾。

第 1 期検証計画³⁾の中で、構造材場モデルの欠点は管壁内部を 2 ノードで表現していることであることが報告されている。また、現在、大型炉に提案している改良 FAIDUS 集合体概念⁷⁾の成立性に関しては内部ダクトの破損タイミングが極めて重要であり、構造材内の熱伝導の予測能力の向上が求められる。そこで、構造材内非定常熱伝導の解析精度向上のため、管壁内部のメッシュ数を従来の 2 ノードから多ノードへ拡張したモデルを開発した。この有益性は第 2 章で述べる。なお、本モデルの組み込みは、SIMMER-III Ver. 3.A および SIMMER-IV Ver. 2.A に対して行われた。

本報告書では、開発された多ノード管壁モデルのモデル概要に加えて、従来モデルについても記述する。最後に本報告書の構成であるが、第 2 章にモデル概要および基本的仮定並びに多ノード化の有益性、第 3 章に幾何形状および初期化、第 4 章に構造材配位モデルを記す。第 5 章と第 6 章はそれぞれ熱伝達モデルおよび質量移行モデルを記述し、第 7 章には基本的なモデル検証を実施した。

2 構造材場モデルの概要

2.1 モデル概要および基本的仮定

本節では、モデル化にあたって採用した主要な仮定およびそれにより生じる制限事項等について述べる。

2.1.1 SIMMER-III/IV における成分

表 1 および表 2 にそれぞれ SIMMER-III および SIMMER-IV における構造材場の密度成分並びにエネルギー成分の一覧を示す。また、後述の構造材場と流体場との相互作用で必要となる液体場および蒸気場の成分の一覧についても表 3 および表 4 にまとめて示す。流体力学計算セルにおける構造材場（燃料ピンおよび集合体管壁）の配位を図 2 に示す。

2.1.2 集合体管壁

集合体管壁（can wall）モデルの幾何学的形状は図 2 に示すとおりであるが、モデル化に際して用いた仮定は次のとおりである。なお、標準オプションでは、実機における集合体管形状を模擬するために平板体系が使用されるが、現在では実験解析などを対象とした円筒体系のオプションも備えている。

集合体管壁の熱計算は流体との結合の強さと効率を考慮して、流体力学の「ステップ 1」の中で流体力学タイムステップを用いて行う。

集合体管壁は流体との相互作用の強い表面皮相部分（ここでは「表面ノード」（surface node）または「境界ノード」（boundary node）と呼ぶ。）と内部（ここでは「内部ノード」（interior node）と呼ぶ。）とに分けて取り扱われている。本報告書では、この内部ノードを多ノード化にすることを述べるが、その基本構造は維持している。表面ノードの厚みは過渡熱伝導における熱透過距離（thermal penetration length; $2\delta_M$ ）から評価する。また、それぞれのノードに対して密度成分とエネルギー成分とが定義される。これにより、集合体管壁と流体との結合がより正確に記述できる。

集合体管壁は流体力学部計算セルの左右両端境界（SIMMER-IV では前後両端境界も含む）に存在することを基本とし、左側管壁と右側管壁とに完全に区別して取り扱う。したがって、集合体管壁は合計 4 種（SIMMER-IV では 8 種）の密度およびエネルギー成分でモデル化することになる。成分数をこのように増加することは、計算時間およびメモリの両方の観点からも好ましいことではなかったが、コードのフレキシビリティを確保するという点からは重要な選択であった。特に、高速炉シビアアクシデントの遷移過程における炉心の熔融進展（meltout）を正確に記述するために重要となる。

集合体管壁間のギャップ体積は、いわゆる非流体体積（non-flow volume）としてモデル化する。これは、構造材が健全である間は流体が流れ込むことのできない体積で構造材場の体積率 α_s の一部として加算される。また、非流体体積は左右の集合体管壁に対して独立に与えることができるため、実験体系のモデル化等をフレキシブルに行うことが可能である。なお、ギャップを模擬した非流体体積は、片側の集合体管壁が消失した時点で流体場の体積に解放されることは言うまでもない。

集合体管壁の表面にはクラスト燃料が存在できる。集合体管壁を計算セルの左右の成分に区別しているため、クラスト燃料も左右の成分に分けて扱う。これも遷移過程における熔融進展挙動

を正確に扱う上で重要な点である。

流体の熱および質量移行モデルとの結合は、表面ノードを通じて行われる。内部ノードの熱計算は表面ノードと流体との熱および質量の移行量を境界条件として行われる。集合体管壁が溶融することで「薄い」管壁となった場合には、集合体管壁は表面ノードの存在しない内部ノード 1 点で代表し、流体場とその内部ノードが直接結合される。なお、管壁の「厚い」、「薄い」の定義は第 4 章にて述べる。

流体の径方向セルを越えた対流は、集合体管壁が健全である間は生じない。メッシュセル境界にある 2 つの隣接セルのそれぞれの右側および左側の集合体管壁が破損して初めて径方向にものが流れるようになる。ただし、一部のモデル（機械的破損モデル）では、クラックサイズの破損口を想定した径方向流動が可能である。

メッシュセル境界にある 2 つの隣接セルの集合体管壁が存在する（内部ノードのマクロ質量が存在する）とき、両セル間は断熱として扱われる。片側の集合体管壁が消失した場合には、消失した側のセルに表面ノードを設定し、これを通して隣接セルの流体との熱および質量移行が計算される。これにより、セル間の熱伝達を計算することができる。

集合体管壁が破損したとき（または、溶融しつつあるとき）には、その表面に存在しているクラスト燃料も併せて破損するものとする。温度が融点に達していない場合には固体燃料粒子となる。この仮定により、クラスト燃料だけが宙に浮いた状態で存在することは無くなる。

2.2 多ノード集合体管壁モデルの有益性

前述のように、現行の管壁内熱伝導モデルでは、熱通過距離で定義される表面ノードとその残りの内部ノードの 2 ノードの温度点で計算される。これにより、1 ノードのみで計算していた SIMMER-II に比べて熱過渡応答が改善された。しかしながら、熱通過距離は入力変数で定義され、コード利用者は主要伝熱現象の継続時間のオーダーに合わせて入力値を設定する必要があることが、SIMMER-III の第 1 期検証研究³⁾において指摘された。例えば、ミリ秒オーダーの熱応答を優先して表面ノードを設定した場合、長期的な伝熱挙動の計算誤差が大きくなる。実機評価においては、溶融燃料が管壁と接触して燃料クラストが形成され、このクラストを介して数秒オーダーで構造材が加熱・溶融することを想定すると、短期応答としてクラストの形成を正しく取り扱うこと、長期応答として構造材内熱伝導を正しく評価することが求められる。この取り扱いに際して、2 ノードでは厳密性を欠くことは上述のとおりである。

さて、単純な例として、ここでは、高温の溶融燃料が低温の管壁に瞬時に接触することを考えてみる。図 4 に示すように、このケースでは非定常の伝熱であるため、壁面表面がステップ状に上昇し、内部はそれに追従していく。それに対して、2 ノードでモデル化した場合、内部ノードの温度上昇が厳密解に比べて遅くなる。これは、図中にも示しているが、管壁内の熱流束が異なるからである。コード内では、差分法を用いるため、熱伝達係数は構造材の熱伝導率をノード幅で除することにより定義する。表面ノードと内部ノードとの間の熱流束はこれらの熱伝達係数および温度差で求められるが、2 ノードの場合には、内部ノードの熱伝達係数が小さいため表面ノードと内部ノード間の総括熱伝達係数が小さくなることから表面ノードから内部ノードへの熱流束を過小評価する。これにより、表面ノードの熱拡散が過小評価され、表面ノードの温度は厳密解よりも高くなり、溶融燃料と表面ノードとの温度差が小さくなるため、この両者間の熱流束も小さくなる。つまり、2 ノードの場合、この過小評価された熱流束のため、溶融燃料の温度低下および構造材の温度上昇は緩慢になるのである。図中に示しているように、これを多ノードに拡張すれば、実際の温度分布を模擬できることが想像できよう。

3 幾何形状および初期化

3.1 集合体管壁の幾何形状

集合体管壁の横方向の形状については、図 3 に示すように、実際には左右それぞれの集合体管壁またはクラストの有無、集合体間への厚み等により、いくつかの状況が起こりうる。例えば健全な炉心状態を考えれば、メッシュセル境界に 2 つの隣接セルからの十分な厚みの集合体管壁が存在し、その間は断熱と仮定されるので、それぞれの独立した集合体管壁が片側で流体と接していることになる。最も複雑となるのは、片側の集合体管壁が消失し、隣接セルの集合体管壁とのセル間熱移行を計算する状況で、この場合図に示すように集合体間壁が両側で流体と接するようになる。この場合もピン燃料と同様に、流体に接する境界にスチールに対する熱透過距離を基に表面ノードを設定する。クラストは単に 1 ノードで近似する。

3.2 入力データおよび初期化

構造材場モデルに関係する入力データのうち、ピン燃料の内部ノードを除く構造材場成分は全て流体力学の成分と共通であるため、同じ入力データを使用する。すなわち、入力ピン燃料の内部ノードを含め、エネルギー成分を基本として、体積率と温度を用いて行い、EOS ルーチンを通じて SIMMER-III/IV の独立変数である巨視的密度と比内部エネルギーに変換する。また、密度成分を計算する際に必要となる fertile/fissile 燃料間の質量の分割については、fissile 燃料の富化度（全燃料中の fissile 燃料の割合）を入力する。問題は、ピン燃料および集合体管壁の熱透過距離をコード内部で計算するため、入力時には内部ノードと表面ノードの体積割合が不明である。そこで、初期化の段階で $2\delta_M$ を計算した後、まず rezoning を行い、表面ノードの再設定を行うというアルゴリズムを作成した。したがって、入力は任意の表面ノードを想定して準備すればいいことになる。

構造材場モデルで初期条件として必要となる入力変数は次のとおりである。ここでは、簡易燃料ピンモデルの変数も含む。

- ・燃料とスチールのための構造材の熱的時定数
- ・構造材成分の初期体積率
- ・構造材成分の初期温度
- ・被覆管外径の定義に使用される初期燃料ピン半径
- ・被覆管、左右管壁（SIMMER-IV では前後を含む）の単位体積あたりの表面積
- ・燃料ピンの軸方向形状
- ・上下プレナムガスの圧力および温度

3.2.1 熱透過距離の計算

表面ノードの過渡熱伝導を考慮して、熱透過距離は次式で定義する。式は、燃料（制御材）およびスチールで共通である。

$$2\delta_M = \psi \sqrt{\kappa_M \tau_{str,M} / \rho_M c_M} \quad (1)$$

ここで、 κ_M 、 ρ_M および c_M は、それぞれ成分 M（1：燃料、2：スチール）に対する熱伝導率、

密度および比熱を表している。なお、上式の物性データは solidus 点を用い、熱透過距離は初期化のときに 1 度だけ計算し、過渡計算中は変わらないものとする。温度時定数 $\tau_{str,M}$ は入力で与えられるもので、解析対象としている時間スケールに応じて設定すべきである。比例乗数 ψ は次式で定義される。

$$\psi = 2\sqrt{3} \quad (2)$$

これは、平板中の過渡熱伝導における温度分布が二次関数で近似できると仮定した場合に対応する。構造材温度時定数を選択する際には熱計算の安定性を考慮する必要がある。構造材表面ノードの熱伝達係数は次式を満たすように制限されねばならない。

$$h = \kappa_M / \delta_M \leq \bar{\rho}_M c_M / a_M \Delta t \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\rho}_M$ および a_M は、それぞれ表面ノードにおけるマクロ密度、単位体積あたりの表面積を表しており、 Δt は計算タイムステップ幅である。マクロ密度、伝熱面積および熱透過距離の間には次式の関係がある。

$$2\delta_M = \bar{\rho}_M / (\rho_M a_M) \quad (4)$$

これら 2 式から、容易に次式が導かれる。

$$\Delta t \leq 6\tau_{str,M} \quad (5)$$

実際には、入力の温度時定数はタイムステップ幅と比べるとかなり大きいので、計算の不安定性が生じることなく、ほとんどの場合に上式のリミッターが有効となることはない。ただし、構造材表面の熱応答を良くするために温度時定数を小さく入力する場合、タイムステップ幅が大きくなった際の構造材の熱応答には注意を払っておく必要がある。

3.2.2 集合体管壁の初期化

ここでは、左側集合体管壁に対してのみ記述するが、取り扱いは右側管壁 (SIMMER-IV では前後も含む) に対してもまったく同等である。以下では、平板体系と円筒体系の場合を記述する。まず、集合体管壁の厚みを計算する。

$$W_{LCW} = \frac{\alpha_{s5}^i + \alpha_{s6}^i}{a_{LCW}^i} \quad \text{for the slab geometry and,} \quad (6)$$

$$W_{LCW} = \sqrt{r_{c0}^2 + (r_{c1}^2 - r_{c0}^2)(\alpha_{s5}^i + \alpha_{s6}^i)} - r_{c0} \quad \text{for the cylindrical geometry} \quad (7)$$

ここで、 r_{c0} および r_{c1} は、セル ij における左側境界および右側境界の半径をそれぞれ表している。

集合体管壁が熱透過距離の 2 倍より小さい ($W_{LCW} < 4\delta_s$) 場合、管壁は薄い壁とみなされ、管壁の体積率は内部ノードのみで表される。その管壁の体積率と温度の初期値を次式に示す。

$$\alpha_{s5} = 0, \quad \alpha_{s6} = \alpha_{s5}^i + \alpha_{s6}^i, \quad \text{and} \quad (8)$$

$$T_{S5} = T_s^0, \quad T_{S6} = \frac{\alpha_{S5}^i T_{S5}^i + \alpha_{S6}^i T_{S6}^i}{\alpha_{S6}} \quad (9)$$

ここで、 T_s^0 は、EOS ルーチンで定義される最小内部エネルギーである。

集合体管壁が熱透過距離の 2 倍より大きい ($W_{LCW} \geq 4\delta_s$) 場合、管壁は厚い壁とみなされ、一旦、2つの温度ノードで定義される。マルチノードモデル使用時の内部ノードの細分化については 3.2.3 節で述べる。その 2つの温度ノードの体積率は表面ノード厚みに基づいて定義される。平板体系については次式で表される。

$$\alpha_{S5} = 2\delta_s a_{LCW}^i \quad (10)$$

$$\alpha_{S6} = (\alpha_{S5}^i + \alpha_{S6}^i) - \alpha_{S5} \quad (11)$$

円筒体系については次式で定義される。

$$r_{S5} = \sqrt{r_{C0}^2 + (r_{C1}^2 - r_{C0}^2)(\alpha_{S5}^i + \alpha_{S6}^i)}, \quad r_{S6} = r_{S5} - 2\delta_s \quad (12)$$

$$\alpha_{S5} = \frac{r_{S5}^2 - r_{S6}^2}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (13)$$

$$\alpha_{S6} = \frac{r_{S6}^2 - r_{S0}^2}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (14)$$

次に、温度は単純な体積平均により定義される。

$$T_{S5} = \begin{cases} T_{S5}^i & \text{if } \alpha_{S5} < \alpha_{S5}^i \\ \frac{T_{S5}^i \alpha_{S5}^i + T_{S6}^i (\alpha_{S6} - \alpha_{S6}^i)}{\alpha_{S5}} & \text{if } \alpha_{S5} \geq \alpha_{S5}^i \end{cases} \quad (15)$$

$$T_{S6} = \begin{cases} \frac{T_{S6}^i \alpha_{S6}^i + T_{S5}^i (\alpha_{S6} - \alpha_{S6}^i)}{\alpha_{S6}} & \text{if } \alpha_{S6} < \alpha_{S6}^i \\ T_{S6}^i & \text{if } \alpha_{S6} \geq \alpha_{S6}^i \end{cases} \quad (16)$$

3.2.3 厚い管壁の内部ノードの多ノード化

前節と同様に、左側集合体管壁に対してのみ記述する。

内部ノードのマルチノード化に当たって、メモリ上の制約からノード数は制限せねばならない。通常、実機におけるラップ管厚みは 5mm 程度であり、典型的なスチール熱透過距離 (1ms の時定数) は約 0.3mm を用いると、17 個のノードを必要とする。このことから、デフォルトでは 20 (COMMON 変数: NDCWLM) を採用する。

任意のノード数を設定するため、入力パラメータ N_{LCWH} で与えられるようにするが、実際には

壁面溶融やスチール固化により壁厚みは変更するため、コード内で調整できるようにすることが望ましい。そこで、本モデルでは N_{LCWII} を 0 にすることにより、下記のように、ノード数 N_{LCWI} をコード内で自動計算できるようにした。

$W_{LCW} > (N_{LCWII} + 1) \times 2\delta_s$ 、かつ、 $N_{LCWII} > 0$ の場合

$$N_{LCWI} = N_{LCWII} \quad (17)$$

$W_{LCW} \leq (N_{LCWII} + 1) \times 2\delta_s$ 、あるいは、 $N_{LCWII} = 0$ の場合

$$N_{LCWI} = (W_{LCW} - 2\delta_s) / 2\delta_s \quad (18)$$

$$N_{LCWI} = \min(N_{LCWI}, N_{DCWLM}) \quad (19)$$

次式により、均等にノードサイズを設定する。

$$D_{LCWI} = \frac{W_{LCW} - 2\delta_s}{N_{LCWI}} \quad (20)$$

平板体系における各ノードのマクロ密度は次式で与えられる。

$$\bar{\rho}_{LCWI} = \bar{\rho}_{s9} \frac{D_{LCWI}}{\alpha_{s6} / a_{LCW}} \quad (21)$$

円筒体系については L 番目のノードのマクロ密度は次式で与えられる。

$$\bar{\rho}_{LCWI,n} = \bar{\rho}_{s9} \frac{r_{LCWI,L}^2 - r_{LCWI,L-1}^2}{(r_{s5} - 2\delta_s)^2 - r_{C0}^2} \quad (22)$$

4 構造材配位モデル

4.1 構造材配位モデルの概要

SIMMER-III/IV の過渡計算中には、構造材成分の状態および配位は、熱および運動量を交換しながら時間とともに変化する。構造材成分は、ある条件を満たすと破損し流体成分に移行する。構造材配位モデルは以下のような手順で処理される。

- ・ 構造材成分の有無を同定する。
- ・ 流体場に接する構造材場成分を決定する。
- ・ 構造材の表面ノードの re-zoning を行い、体積率を計算する。
- ・ 熱および質量移行モデルで使用する構造材側の熱伝達係数および伝熱境界面積を求める。
- ・ 構造材体積率と表面積を基に水力等価直径を計算する。

まず、各計算セルに対して、構造材場成分の有無に関するフラグを以下のように定義する。なお、SIMMER-IV では、これらに前後のクラストと管壁が追加される。

ピン燃料 : NF=1 if $\bar{\rho}_{s1} + \bar{\rho}_{s2} > 0$

左側クラスト : NF=2 if $\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4} > 0$

右側クラスト : NF=3 if $\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6} > 0$

被覆管 : NCL=1 if $\bar{\rho}_{s7} > 0$

左側管壁 : NCANL=1 if $\bar{\rho}_{s9} > 0$

右側管壁 : NCANR=1 if $\bar{\rho}_{s11} > 0$

制御材 : NCON=1 if $\bar{\rho}_{s12} > 0$

次に、流体場と接触する構造材場成分を決定し、流体側に渡す情報を計算するが、このときに用いる添え字は次のように定義する。なお、SIMMER-IV では、これらに前後の添え字が追加される。

k1 : 燃料ピン表面（ピン燃料または被覆管）

k2 : 左側管壁表面（クラスト、管壁内部または管壁表面）

k3 : 右側管壁表面（クラスト、管壁内部または管壁表面）

流体の熱および質量移行モデルでは、接する構造材場成分を特定することなく、この添え字を基に一般的な定式化がなされている。なお、SIMMER-III/IV における制御材ピンについては、基本的には燃料ピンと同様に扱われるが、被覆管が喪失した時点でペレットも同時に破損すると仮定しているため、構造材場の制御材ペレットが直接流体と接触することはない。

構造材の熱伝達係数の決定に際しては、熱計算の数値的安定性を考慮して適切な制限値を設けている。

4.2 集合体管壁構造の配位

集合体管壁が存在する径方向セルの位置および隣接セルとの結合（セル間熱移行）を考慮するかどうかについて、以下の3種の状況（SIMMER-IIIの場合）に対してそれぞれ3つのケースを考える必要がある。典型的な構造材配位を図3に示す。

4.2.1 径方向第1実セルの左側境界（ $i=1$ ）

この場合は、単独の左側管壁のみを考慮すればいい。以下の3ケースがある。

Case 1（1 ノード）：NCANL=1；NF=2であれば、クラストが $\bar{\rho}_{s9}$ に結合される。

Case 2（2 ノード）：NCANL=1；NF=2であれば、クラストが $\bar{\rho}_{s8}$ に結合される。

Case 3（管壁なし）：NCANL=0

4.2.2 径方向最終実セルの右側境界（ $i=IB$ ）

この場合は、単独の左側管壁のみを考慮すればいい。以下の3ケースがある。

Case 4（1 ノード）：NCANR=1；NF=2であれば、クラストが $\bar{\rho}_{s11}$ に結合される。

Case 5（2 ノード）：NCANR=1；NF=2であれば、クラストが $\bar{\rho}_{s10}$ に結合される。

Case 6（管壁なし）：NCANR=0

4.2.3 通常の実セル境界（ $2 \leq i \leq IB-1$ ）

この場合、1つのセル境界に存在する両側の流体力学セルからの管壁2枚（左側セルの右側管壁および右側セルの左側管壁）を同時に考慮する必要がある。基本的には、以下の3ケースを考慮する必要がある。

Case 7（両管壁存在）：NCANL(ij+1)+NCANR(ij)=2

Case 8（片側のみ存在）：NCANL(ij+1)+NCANR(ij)=1

Case 9（管壁なし）：NCANL(ij+1)+NCANR(ij)=0

ケース7では、セル境界を挟んだ2つの管壁は熱的に分離される。また、各管壁についてその構造材ノード数に応じてさらに2ケースに分けられる。クラストの結合についても、ケース1、2、4および5の場合と同様に扱われる。

ケース8では、境界の両側のセル(ij)および(ij+1)の結合を行うため、最も煩雑な処理を行う必要がある。さらに、存在する管壁が「薄い (thin)」か「厚い (thick)」かの区別も必要になる。薄い場合、管壁が存在するセルの内部ノードは1点のみで管壁を代表させ、クラストが存在する場合にはクラストと結合される。厚い場合には、流体と結合するために両側に表面ノードを設定し、クラストが有る場合にはクラストと表面ノードを結合する。この場合、管壁が存在しないセルでは表面ノードのみを存在させることになるが、その体積率については管壁が存在するセルに加えられる。すなわち、元々管壁の存在しなかったセルにおいても、流体の熱および質量移行の計算で使用する表面ノードの質量（マクロ密度）は隣接セルから分割・移管して、あたかも自分のセルの質量のように取り扱うことができるが、その構造材体積率は元のセルに加算し、体積率の合計が保存されるようにしている。この手法では、構造材体積率の計算は複雑になるが、流体力学計算における特別の処理が不要であるという利点がある。

ケース9は集合体管壁が存在しない場合に相当し、この場合には同時にクラストも存在できない。この場合のみ、流体の横方向の移動が許容される。

4.3 集合体管壁の厚み

集合体管壁の配位モデルはその厚みで取り扱いが異なるため、まず、左側および右側管壁（SIMMER-IV では前後管壁が追加される）の厚みをそれぞれ次式で計算する。ここでは、平板体系および円筒体系について記述する。平板体系における厚みは次のように表される。

$$W_{LCW} = \left[\alpha_{S5} + \alpha_{S6} + \alpha_{S7,ij-1} \frac{V_{ij-1}}{V_{ij}} \right] / a_{LCW} \quad (23)$$

$$W_{RCW} = \left[\alpha_{S7} + \alpha_{S8} + \alpha_{S5,ij+1} \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} \right] / a_{RCW} \quad (24)$$

ここで、 V_{ij} はセル体積、 a_{LCW} および a_{RCW} は左側および右側管壁の表面積である。円筒体系の場合は次式である。

$$W_{LCW} = \sqrt{r_{C0}^2 + (r_{C1}^2 - r_{C0}^2) \left(\alpha_{S5} + \alpha_{S6} + \alpha_{S7,ij-1} \frac{V_{ij-1}}{V_{ij}} \right)} - r_{C0} \quad (25)$$

$$W_{RCW} = r_{C1} - \sqrt{r_{C0}^2 + (r_{C1}^2 - r_{C0}^2) \left[1 - \left(\alpha_{S7} + \alpha_{S8} + \alpha_{S5,ij+1} \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} \right) \right]} \quad (26)$$

ここで、 r_{C0} および r_{C1} はそれぞれ左側および右側セル境界の半径である。

上式で使用されているセル体積比は、隣接セルの管壁が存在しないときにのみ加算されるが、隣接セルからマクロ密度を移管する際に必要な換算係数である。SIMMER-III/IV の独立変数は単位体積あたりの値を基本としており、質量保存を満足するためにこのような扱いが必要となる。

円筒体系を使用する場合、タイムステップ毎に管壁表面積は計算されるのに対して、平板体系を使用する場合、一定の入力値がそのまま適用される。

管壁が厚いか薄いかの判定は、表面ノード（常に $2\delta_s$ の厚さに設定される。）を除いた内部ノードの厚さが $2\delta_s$ よりも大きい小さいかという点に着目して行う。したがって、管壁の片側にのみ表面ノードを設定する場合（ケース1、2、4、5、7）、厚さが $2\delta_s$ の2倍より小さい ($W \leq 4\delta_s$) なら管壁厚みを薄いと判断する。両側に表面ノード設定する場合（ケース8）、厚さが $2\delta_s$ の3倍より小さい ($W \leq 6\delta_s$) なら管壁厚みを薄いと判断する。

4.4 集合体管壁内ノードの厚みと数

3.2.3 節とほぼ同様であるが、隣接セルの存在を考慮する必要がある。ここでは、左側集合体管壁に対してのみ記述する。

$W_{LCW} > (N_{LCWH} + 1) \times 2\delta_s + (2\delta_s)_{S7,ij-1}$ 、かつ、 $N_{LCWH} > 0$ の場合

$$N_{LCWI} = N_{LCWH} \quad (27)$$

$W_{LCW} \leq (N_{LCWII} + 1) \times 2\delta_s + (2\delta_s)_{S7,ij-1}$ 、あるいは、 $N_{LCWII} = 0$ の場合

$$N_{LCWI} = (W_{LCW} - 2\delta_s - (2\delta_s)_{S7,ij-1}) / 2\delta_s \quad (28)$$

$$N_{LCWI} = \min(N_{LCWI}, N_{DCWLM}) \quad (29)$$

$$D_{LCWI} = \frac{W_{LCW} - 2\delta_s - (2\delta_s)_{S7,ij-1}}{N_{LCWI}} \quad (30)$$

4.5 径方向第 1 実セルの左側境界の管壁の計算

4.5.1 ケース 1（管壁が薄い場合）

管壁が薄いと判断された場合、すなわち、 $W_{LCW} \leq 4\delta_s$ の場合、管壁は内部ノード 1 点に統合される。

(a) 平板体系の場合

マクロ密度および比内部エネルギーは次式で計算される。

$$\tilde{\rho}_{s9}^{n+1} = \bar{\rho}_{s8}^n + \bar{\rho}_{s9}^n, \quad \tilde{\rho}_{s8}^{n+1} = 0 \quad (31)$$

$$\tilde{e}_{s6}^{n+1} = \frac{\bar{\rho}_{s8}^n e_{s5}^n + \bar{\rho}_{s9}^n e_{s6}^n}{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}}, \quad \tilde{e}_{s5}^{n+1} = e_{s,2}^0 \quad (32)$$

ここで、上付き添え字 n はタイムステップ番号を表す。また、 $e_{s,2}^0$ は固体スチールのゼロ点エネルギーで、ある成分が存在しない場合に問題を避けるためにゼロでない有限の最小値を EOS ルーチンで入れているものである。次に、平板を想定しているとき、熱伝達面積はクラストがあってもなくても初期値がそのまま使われる。

$$a_{LCW} = a_{LCW}^i \quad (33)$$

クラストが存在する場合のクラストおよび管壁の熱伝達係数は次式で計算する。このときはクラストが流体場と接触するものとする。

$$h_{s2} = \frac{2\kappa_f a_{LCW}}{\alpha_{s2}^n}, \text{ and} \quad (34)$$

$$h_{k2} = \min \left[\frac{(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4}) c_{s2}}{\Delta t a_{LCW}}, h_{s2} \right] \quad (35)$$

クラストが薄くなってくると、熱伝達計算が不安定になってくる。したがって、構造材側の熱伝達係数は、その熱容量を超えないように制限される。

クラストが存在しない場合、管壁が直接流体場に接するものとし、熱伝達係数は次式で計算する。

$$h_{s6} = \frac{2\kappa_s a_{LCW}}{\tilde{\alpha}_{s6}^{n+1}}, \text{ and} \quad (36)$$

$$h_{k2} = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1} c_{s6}}{\Delta t a_{LCW}}, h_{s6} \right] \quad (37)$$

クラストが存在するときの構造材成分間の熱伝達係数は次式となる。

$$h_{s2,s6} = \frac{h_{s2} h_{s6}}{h_{s2} + h_{s6}} \quad (38)$$

(b) 円筒体系の場合

管壁が円筒座標系で表される場合には、まずノード境界及び温度点の半径をそれぞれ定義する必要がある。それらは図 6 に示される。

管壁表面および温度点の半径はそれぞれ次式で与えられる。

$$r_4 = r_{C0} + W_{LCW} \quad \text{and} \quad r_{t4} = \sqrt{(r_{C0}^2 + r_4^2)/2} \quad (39)$$

ここで、 r_{C0} は当該計算セルの左側境界の半径であり、この場合は $r_{C0} = 0$ である。

マクロ密度は次のように計算される。

$$\tilde{\rho}_{s9}^{n+1} = \frac{1}{v_s} \frac{r_4^2 - r_{C0}^2}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad \text{and} \quad \tilde{\rho}_{s8}^{n+1} = 0 \quad (40)$$

ここで、 r_{C1} は当該計算セルの右側境界の半径である。比内部エネルギーは前述の平板体系と同様に求められる。

クラストが存在しない場合、管壁の熱伝達係数は次式となる。

$$h_{s6} = \frac{\kappa_s}{r_4 \ln(r_4/r_{t4})}, \text{ and} \quad (41)$$

$$h_{k2} = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1} c_{s6}}{\Delta t a_{LCW}}, h_{s6} \right] \quad (42)$$

流体場と接触する管壁の表面積は次式で定義される。

$$a_{LCW} = \frac{2r_4}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (43)$$

クラストが存在する場合、管壁の熱伝達係数は次式となる。

$$h_{s2} = \frac{\kappa_f}{r_6 \ln(r_6/r_{t6})} \quad \text{and} \quad (44)$$

$$h_{k2} = \min \left[\frac{(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})c_{s2}}{\Delta ta_{LCW}}, h_{s2} \right] \quad (45)$$

ただし、 r_6 および r_{t6} は次式で与えられる。

$$r_6 = \sqrt{r_{C0}^2 + (r_{C1}^2 - r_{C0}^2)(\alpha_{s2}^n + \tilde{\alpha}_{s5}^{n+1} + \tilde{\alpha}_{s6}^{n+1})}, \text{ and } r_{t6} = \sqrt{(r_4^2 + r_6^2)/2} \quad (46)$$

流体場と接触する管壁の表面積は次式となる。

$$a_{LCW} = \frac{2r_6}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (47)$$

クラストが存在する場合のクラストと管壁との間の伝熱面積および熱伝達係数はそれぞれ次式で与えられる。

$$a_{s2,s6} = \frac{2r_4}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2}, \text{ and} \quad (48)$$

$$h_{s2,s6} = \frac{1}{r_4 [\kappa_s^{-1} \ln(r_4/r_{t4}) + \kappa_f^{-1} \ln(r_{t6}/r_4)]} \quad (49)$$

4.5.2 ケース 2（管壁が厚い場合）

管壁が厚いとみなされる場合、すなわち、 $W_{LCW} > 4\delta_s$ の場合、表面ノード厚さは一定値（ $2\delta_s$ ）に保たれる。そのため、以下のような rezoning 処理を行なう。

(a) 平板体系の場合

rezoning 処理は次のようなアルゴリズムで行なわれる。

$$\tilde{\rho}_{s8}^{n+1} = \frac{2\delta_s}{W_{LCW}} (\bar{\rho}_{s8}^n + \bar{\rho}_{s9}^n) \quad (50)$$

$$\tilde{\rho}_{s9}^{n+1} = \bar{\rho}_{s8}^n + \bar{\rho}_{s9}^n - \tilde{\rho}_{s8}^{n+1} \quad (51)$$

$$\tilde{e}_{s5}^{n+1} = \begin{cases} e_{s5}^n & \text{if } \tilde{\rho}_{s8}^{n+1} < \bar{\rho}_{s8}^n \\ \frac{[\bar{\rho}_{s8}^n e_{s5}^n + (\tilde{\rho}_{s8}^{n+1} - \bar{\rho}_{s8}^n) e_{s6}^n]}{\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}} & \text{if } \tilde{\rho}_{s8}^{n+1} \geq \bar{\rho}_{s8}^n \end{cases} \quad (52)$$

$$\tilde{e}_{S6}^{n+1} = \begin{cases} \frac{\left[\bar{\rho}_{S9}^n e_{S6}^n + (\tilde{\rho}_{S9}^{n+1} - \bar{\rho}_{S9}^n) e_{S5}^n \right]}{\tilde{\rho}_{S9}^{n+1}} & \text{if } \tilde{\rho}_{S9}^{n+1} \geq \bar{\rho}_{S9}^n \\ e_{S6}^n & \text{if } \tilde{\rho}_{S9}^{n+1} < \bar{\rho}_{S9}^n \end{cases} \quad (53)$$

クラストが存在する場合の熱伝達係数は、ケース 1 と同様に以下の式で計算される。管壁の表面ノードおよび内部ノードの熱伝達係数は

$$h_{S5} = \frac{2\kappa_s a_{LCW}}{\tilde{\alpha}_{S5}^{n+1}}, \text{ and } h_{S6} = \frac{2\kappa_s a_{LCW}}{\tilde{\alpha}_{S6}^{n+1}} \quad (54)$$

で表され、それらノード間の熱伝達係数は次式で計算される。

$$h_{S2,S5} = \frac{h_{S2} h_{S5}}{h_{S2} + h_{S5}}, \text{ and } h_{S5,S6} = \frac{h_{S5} h_{S6}}{h_{S5} + h_{S6}} \quad (55)$$

構造材側の熱伝達係数は、クラストの熱容量が十分小さい場合を考慮して次式で計算する。

$$h_{k2} = \min \left[\frac{(\bar{\rho}_{S3}^n + \bar{\rho}_{S4}^n) c_{S2}}{\Delta t a_{LCW}}, h_{S2} \right], \text{ if crust exists, or} \quad (56)$$

$$h_{k2} = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{S8}^{n+1} c_{S5}}{\Delta t a_{LCW}}, h_{S5} \right], \text{ if crust does not exist} \quad (57)$$

(b) 円筒体系の場合

ノード境界および温度点の半径を用いて、以下のようなアルゴリズムで rezoning 処理を行なう。なお、比内部エネルギーの定義は前述の平板体系と同じである。

$$r_5 = \sqrt{r_{C0}^2 + (r_{C1}^2 - r_{C0}^2)(\alpha_{S5}^n + \alpha_{S6}^n)}, \quad r_4 = r_5 - 2\delta_s \quad (58)$$

$$\tilde{\rho}_{S8}^{n+1} = \frac{1}{v_s} \frac{r_5^2 - r_4^2}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad \text{and} \quad \tilde{\rho}_{S9}^{n+1} = \frac{1}{v_s} \frac{r_4^2 - r_{C0}^2}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (59)$$

クラストが存在しない場合、管壁の表面積および熱伝達係数はそれぞれ次式で表される。

$$a_{LCW} = \frac{2r_5}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (60)$$

$$h_{S5} = \frac{\kappa_s}{r_5 \ln(r_5/r_{t5})}, \text{ where } r_{t5} = \sqrt{(r_4^2 + r_5^2)/2} \quad (61)$$

$$h_{k2} = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{S8}^{n+1} c_{S5}}{\Delta t a_{LCW}}, h_{S5} \right] \quad (62)$$

クラストが存在する場合のクラストの熱伝達係数および構造材表面積はケース 1 と同様となる。

管壁の内部ノードの熱伝達係数、管壁の表面ノードと内部ノードとの間の表面積および熱伝達係数は次式で与えられる。

$$h_{s6} = \frac{\kappa_s}{r_4 \ln(r_4/r_{t4})}, \text{ where } r_{t4} = \sqrt{(r_4^2 + r_{C0}^2)/2} \quad (63)$$

$$a_{s5,s6} = \frac{2r_4}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (64)$$

$$h_{s5,s6} = \frac{1}{r_4 [\kappa_s^{-1} \ln(r_{t5}/r_4) + \kappa_s^{-1} \ln(r_4/r_{t4})]} \quad (65)$$

また、クラストー表面ノード間の表面積および熱伝達係数は次式となる。

$$a_{s2,s5} = \frac{2r_5}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2}, \text{ and } h_{s2,s5} = \frac{1}{r_5 [\kappa_s^{-1} \ln(r_5/r_{t5}) + \kappa_f^{-1} \ln(r_{t6}/r_5)]} \quad (66)$$

$$r_6 = \sqrt{r_{C0}^2 + (r_{C1}^2 - r_{C0}^2)(\alpha_{s2}^n + \alpha_{s5}^n + \alpha_{s6}^n)} \text{ and } r_{t6} = \sqrt{(r_5^2 + r_6^2)/2} \quad (67)$$

4.5.3 ケース 2'（管壁が厚い場合で、内部ノードを多ノード化する場合）

前節の内部ノードを多ノード化する場合、 L 番目のノードは前タイムステップのノード幅 D_{LCWP} との差を考慮する必要がある。まず、前タイムステップと更新されたタイムステップにおける各ノードの長さを以下のように定義する。

$$r_{LCWI,m}^n = m \times D_{LCWP} \quad \text{for } m = 1 \sim NLCWP \quad (68)$$

$$\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} = L \times D_{LCWI} \quad \text{for } L = 1 \sim NLCWI \quad (69)$$

(a) 平板体系の場合

$$\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1} = \tilde{\rho}_{s9}^{n+1} \frac{D_{LCWI}}{W_{LCW} - \tilde{\rho}_{s8}^{n+1} \nu_s / a_{LCW}} \quad (70)$$

$$\tilde{e}_{LCW,L}^{n+1} = \begin{cases} \left[\frac{\bar{\rho}_{LCWI,m-1}^n e_{LCWI,m-1}^n \frac{r_{LCWI,m-1}^n - \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1}}{r_{LCWI,m-1}^n - r_{LCWI,m-2}^n} + \bar{\rho}_{LCWI,m}^n e_{LCWI,m}^n \frac{\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} - r_{LCWI,m-1}^n}{r_{LCWI,m}^n - r_{LCWI,m-1}^n} \right] \\ \quad \tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1} \\ \quad \text{if } \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \leq r_{LCWI,NLCWP}^n \\ \left[\frac{\bar{\rho}_{LCWI,m}^n e_{LCWI,m}^n \frac{r_{LCWI,m}^n - \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1}}{r_{LCWI,m}^n - r_{LCWI,m-1}^n} + \bar{\rho}_{s8}^n e_{s5}^n \frac{\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} - r_{LCWI,m}^n}{r_{LCWI,m+1}^n - r_{LCWI,m}^n} \right] \\ \quad \tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1} \\ \quad \text{if } \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1} \leq r_{LCWI,NLCWP}^n \leq \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \\ e_{s5}^n \\ \quad \text{if } r_{LCWI,NLCWP}^n < \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1} \end{cases} \quad (71)$$

$$h_{LCWI,L} = \frac{2\kappa_s}{D_{LCWI}} \quad (72)$$

$$h_{(LCWI,L),(LCWI,L-1)} = \frac{h_{LCWI,L-1} h_{LCWI,L}}{h_{LCWI,L-1} + h_{LCWI,L}} \quad (73)$$

(b) 円筒体系の場合

ノード境界および温度点の半径を用いて、以下のような処理を行なう。

$$\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1} = \tilde{\rho}_{s9}^{n+1} \frac{\tilde{r}_{LCWI,L}^2 - \tilde{r}_{LCWI,L-1}^2}{r_4^2 - r_{C0}^2} \quad (74)$$

$$\tilde{e}_{LCW,L}^{n+1} = \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\bar{\rho}_{LCWI,m-1}^n e_{LCWI,m-1}^n \frac{r_{LCWI,m-1}^n{}^2 - \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1}{}^2}{r_{LCWI,m-1}^n{}^2 - r_{LCWI,m-2}^n{}^2} + \bar{\rho}_{LCWI,m}^n e_{LCWI,m}^n \frac{\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1}{}^2 - r_{LCWI,m-1}^n{}^2}{r_{LCWI,m}^n{}^2 - r_{LCWI,m-1}^n{}^2} \right] \\ \quad \tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1} \\ \quad \text{if } \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \leq r_{LCWI,NLCWP}^n \\ \left[\frac{\bar{\rho}_{LCWI,m}^n e_{LCWI,m}^n \frac{r_{LCWI,m}^n{}^2 - \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1}{}^2}{r_{LCWI,m}^n{}^2 - r_{LCWI,m-1}^n{}^2} + \bar{\rho}_{s8}^n e_{s5}^n \frac{\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1}{}^2 - r_{LCWI,m}^n{}^2}{r_{LCWI,m+1}^n{}^2 - r_{LCWI,m}^n{}^2} \right] \\ \quad \tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1} \\ \quad \text{if } \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1} \leq r_{LCWI,NLCWP}^n \leq \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \\ e_{s5}^n \\ \quad \text{if } r_{LCWI,NLCWP}^n < \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1} \end{array} \right. \quad (75)$$

$$h_{LCWI,L} = \frac{\kappa_s}{\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \ln(\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} / r_{iLCWI,L})} , \text{ where } r_{iLCWI,L} = \sqrt{(\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1}{}^2 + \tilde{r}_{LCWI,L-1}^{n+1}{}^2) / 2} \quad (76)$$

$$h_{(LCWI,L),(LCWI,L+1)} = \frac{1}{\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} [\kappa_s^{-1} \ln(r_{iLCWI,L+1} / \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1}) + \kappa_s^{-1} \ln(\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} / r_{iLCWI,L})]} \quad (77)$$

4.6 径方向最終実セルの右側境界の管壁の計算

この条件に対応するケース4および5は、ケース1および2とそれぞれ同様になる。したがって、添字を左側管壁および左側クラストから右側の対応成分のそれに置換することにより、全く同じ定式化が使用できる。流体と接する成分の熱伝達係数も h_{k2} から h_{k3} に変更される。

4.7 通常の実セルの境界の管壁の計算

セル境界の両側に管壁存在するケース7では、各々のセルは熱的に結合しないで独立に扱われるため、ケース1、2、4、5、と同様の計算を単に2回行なえばよい。

一方、片側の管壁が存在するケース8では、セル間の熱移行をモデル化するための定式化が極めて複雑となるが、管壁が厚いか薄いか、クラストが存在するか否かの組み合わせでさらに4つの場合に分けて取り扱う。管壁が厚い場合には内部ノードの両側に表面ノードのある3層の管壁を設定し、薄い場合には内部ノード1点で代表することになる。厚い場合には管壁の存在しない隣接セルにも表面ノードを設定するが、構造材場の体積率の計算にはこれを加算しないで、流路の体積率には影響しないようにしている。これは、管壁の体積率の取り扱いにより、セルの人為的な圧力変化を避けるために必要である。4つの場合分けは以下で定義される。

ケース8 a : 管壁が薄く、 $NF2 + NF3 = 0$

ケース 8 b : 管壁が薄く、 $NF2 + NF3 > 0$

ケース 8 c : 管壁が厚く、 $NF2 + NF3 = 0$

ケース 8 d : 管壁が厚く、 $NF2 + NF3 > 0$

なお、以下の各ケースでは、当該セル(ij)の右側境界を対象として、セル(ij)の右側管壁またはセル(ij+1)の左側管壁のいずれかが存在するような状況を考える。

4.7.1 ケース 8a (管壁が薄く、クラストが存在しない場合)

この場合 ($W_{RCW} \leq 6\delta_s$)、表面ノードを管壁が存在するセルの内部ノードに統合し、この内部ノードがセル境界の両側の流体場に接触する。統合に際して、隣接セルから表面ノードの質量を移管する場合にはセル体積比で換算する必要がある。

(a) 平板体系の場合

右側セルの左側管壁が存在する場合 ($NCANL(IJ+1) > 0$) のアルゴリズムは次式で書かれる。

$$\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1) = \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s9}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} \quad (78)$$

$$\tilde{e}_{s6}^{n+1}(ij+1) = \frac{\left[\bar{\rho}_{s8}^n(ij+1)e_{s5}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s9}^n(ij+1)e_{s6}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} e_{s7}^n(ij) \right]}{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1)} \quad (79)$$

次に、左側セルの右側管壁が存在する場合 ($NCANR(IJ) > 0$) の統合アルゴリズムは次式となる。

$$\tilde{\rho}_{s11}^{n+1}(ij) = \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} + \bar{\rho}_{s10}^n(ij) + \bar{\rho}_{s11}^n(ij) \quad (80)$$

$$\tilde{e}_{s8}^{n+1}(ij) = \frac{\left[\bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} e_{s5}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s10}^n(ij)e_{s7}^n(ij) + \bar{\rho}_{s11}^n(ij)e_{s8}^n(ij) \right]}{\tilde{\rho}_{s11}^{n+1}(ij)} \quad (81)$$

また、表面ノードのマクロ密度はゼロに設定される。

$$\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) = 0, \quad \tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) = 0, \quad \tilde{e}_{s5}^{n+1}(ij+1) = e_{s,2}^0, \text{ and } \tilde{e}_{s7}^{n+1}(ij) = e_{s,2}^0 \quad (82)$$

管壁構造は 1 点のみで代表されるため、管壁が存在しないセルの流体場との熱および質量移行をどう記述するかが問題となる。このケースと同様に管壁を 1 点で代表していた SIMMER-II コードでは、管壁の質量を一時的に隣接セルに移管する “set-over” の方法が用いられたが、この手法は極めて処理が煩雑になるという欠点があった。このため、SIMMER-III/IV では、質量の移管は行なわないままで、隣接セルの熱および質量移行の計算の中で、直接当該セルの管壁を結合して解く方法を採用することとした。ただし、隣接セルでの計算を行なうことから、質量を保存するためマクロ密度に対してセル体積比を掛ける必要がある。同様に、流体力学部に渡す構造材の表面積もセル境界を越えて計算する場合にはセル体積比を掛けることになる。

右側セルに左側管壁がある場合 ($NCANL(IJ+1) > 0$)、当該セルの表面積および熱伝達係数、流体場に渡す構造材の熱伝達係数は次式で与える。

$$a_{LCW}(ij+1) = a_{LCW}^i(ij+1) \quad (83)$$

$$a_{RCW}(ij) = a_{LCW}^i(ij+1) \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} \quad (84)$$

$$h_{s6}(ij+1) = \frac{2\kappa_s a_{LCW}(ij+1)}{\tilde{\alpha}_{s6}^{n+1}(ij+1)} \quad (85)$$

$$h_{k3} = h_{k2}(ij+1) = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1) c_{s6}(ij+1)}{\Delta t a_{LCW}(ij+1)}, h_{s6}(ij+1) \right] \quad (86)$$

左側セルに右側管壁がある場合 ($NCANR(IJ) > 0$)、それらは次式となる。

$$a_{RCW}(ij) = a_{RCW}^i(ij) \quad (87)$$

$$a_{LCW}(ij+1) = a_{RCW}^i(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} \quad (88)$$

$$h_{s8}(ij) = \frac{2\kappa_s a_{RCW}(ij)}{\tilde{\alpha}_{s8}^{n+1}(ij)} \quad (89)$$

$$h_{k3} = h_{k2}(ij+1) = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{s11}^{n+1}(ij) c_{s8}(ij)}{\Delta t a_{RCW}(ij)}, h_{s8}(ij) \right] \quad (90)$$

(b) 円筒体系の場合

円筒体系を用いる場合、平板体系における内部ノードのマクロ密度を次式で置き換えるだけで良い。

$$\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1) = \frac{1}{v_s} \frac{r_4^2 - r_{C1}^2}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2}, \text{ if } NCANL(IJ+1) > 0 \quad (91)$$

$$\tilde{\rho}_{s11}^{n+1}(ij) = \frac{1}{v_s} \frac{r_{C1}^2 - r_3^2}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2}, \text{ if } NCANR(IJ) > 0 \quad (92)$$

ここで、 r_{C0} および r_{C1} はセル ij の左側および右側境界の半径をそれぞれ表している。また、 r_{C2} はセル $ij+1$ の右側境界の半径である。 r_3 および r_4 は次式で与えられる。

$$r_3 = r_{C1} - W_{RCW} \quad \text{and} \quad r_4 = r_{C1} + W_{LCW} \quad (93)$$

右側セルに左側管壁がある場合 ($NCANL(IJ+1) > 0$)、当該セルの表面積および熱伝達係数、流体場に渡す構造材の熱伝達係数は次式で与える。

$$a_{LCW}(ij+1) = \frac{2r_4}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad (94)$$

$$a_{RCW}(ij) = \frac{2r_{C1}}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (95)$$

$$h_{s6}(ij+1) = \frac{\kappa_s}{r_4 \ln(r_4/r_{t4})}, \text{ where } r_{t4} = \sqrt{(r_{C1}^2 + r_4^2)/2} \quad (96)$$

$$h_{k3}(ij) = h_{k2}(ij+1) = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1)c_{s6}(ij+1)}{\Delta ta_{LCW}(ij+1)}, h_{s6}(ij+1) \right] \quad (97)$$

左側セルに右側管壁がある場合 ($NCANR(IJ) > 0$)、それらは次式となる。

$$a_{RCW}(ij) = \frac{2r_3}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (98)$$

$$a_{LCW}(ij+1) = \frac{2r_{C1}}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad (99)$$

$$h_{s8}(ij) = \frac{\kappa_s}{r_3 \ln(r_{t3}/r_3)}, \text{ where } r_{t3} = \sqrt{(r_3^2 + r_{C1}^2)/2} \quad (100)$$

$$h_{k2}(ij+1) = h_{k3}(ij) = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{s11}^{n+1}(ij)c_{s8}(ij)}{\Delta ta_{RCW}(ij)}, h_{s8}(ij+1) \right] \quad (101)$$

4.7.2 ケース 8b (管壁が薄く、クラストが存在する場合)

(a) 平板体系の場合

ケース 8 a と同様に、管壁の表面ノードが存在する場合には、これを管壁が存在するセルの内部ノードに統合する。管壁の熱伝達係数もケース 8 a と同様に計算する。クラストの熱伝達係数は次式で計算する。

$$h_{s2}(ij+1) = \frac{2\kappa_f a_{LCW}(ij+1)}{\alpha_{s2}^n(ij+1)}, \text{ and } h_{s3}(ij) = \frac{2\kappa_f a_{RCW}(ij)}{\alpha_{s3}^n(ij)} \quad (102)$$

このとき、構造材外側にはクラストが存在することになるため、構造材側熱伝達係数は次式で求められる。

$$h_{k2}(ij+1) = \min \left[\frac{[\bar{\rho}_{s3}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s4}^n(ij+1)]c_{s2}(ij+1)}{\Delta ta_{LCW}(ij+1)}, h_{s2}(ij+1) \right] \quad (103)$$

$$h_{k3}(ij) = \min \left[\frac{[\bar{\rho}_{s5}^n(ij) + \bar{\rho}_{s6}^n(ij)]c_{s3}(ij)}{\Delta ta_{RCW}(ij)}, h_{s3}(ij) \right] \quad (104)$$

当該セルに右側管壁が存在する場合 ($NCANR(IJ) > 0$)、クラストと管壁との間の熱伝達係数はクラストが左右どちらの管壁に存在するかによって定義が変わる。クラストが当該セルに存在する場合 ($NF3(IJ) > 0$) の熱伝達係数は次式で定義される。

$$h_{s3,s8}(ij) = \frac{h_{s3}(ij)h_{s8}(ij)}{h_{s3}(ij) + h_{s8}(ij)} \quad (105)$$

一方で、クラストが右側隣接セルに存在する場合 ($NF2(IJ+1) > 0$)、クラストー管壁間の結合はセル間の熱移行となり、熱伝達係数と伝熱面積の積として次のように定義する。

$$(ha)_{s2(ij+1),s8(ij)} = \frac{a_{RCW}(ij)h_{s8}(ij)h_{s2}(ij+1)}{h_{s8}(ij) + h_{s2}(ij+1)} \quad (106)$$

右側隣接セルに左側管壁が存在する場合 ($NCANL(IJ+1) > 0$) にも考え方は全く同じであり、添字が異なるだけで全く同じ定式化を用いる。

(b) 円筒体系の場合

ケース 8 a と同様に、管壁表面は結合される。当該セルの右側管壁が存在する場合 ($NCANR(IJ) > 0$)、クラストの熱伝達係数は

$$h_{s2}(ij+1) = \frac{\kappa_f}{r_6 \ln(r_6/r_{t6})} \quad \text{and} \quad h_{s3}(ij) = \frac{\kappa_f}{r_1 \ln(r_{t1}/r_1)} \quad (107)$$

で記述され、各々の半径は次式である。

$$r_6 = \sqrt{r_{C1}^2 + (r_{C2}^2 - r_{C1}^2)\alpha_{s2}^n(ij+1)}, \quad r_{t6} = \sqrt{(r_{C1}^2 + r_6^2)/2} \quad (108)$$

$$r_1 = \sqrt{r_{C0}^2 + (r_{C1}^2 - r_{C0}^2)[1 - (\alpha_{s3}^n(ij) + \alpha_{s8}^n(ij))]}, \quad \text{and} \quad r_{t1} = \sqrt{(r_1^2 + r_{C1}^2)/2} \quad (109)$$

クラストは流体に接触しているから、構造材表面積は次式となる。

$$a_{RCW}(ij) = \frac{2r_1}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad \text{and} \quad a_{LCW}(ij+1) = \frac{2r_6}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad (110)$$

構造材側熱伝達係数は平板体系と同じ定式化が用いられる。

当該セルのクラストー管壁間の熱伝達係数および伝熱面積は次式となる。

$$h_{s3,s8}(ij) = \frac{1}{r_3 [\kappa_f^{-1} \ln(r_3/r_{t1}) + \kappa_s^{-1} \ln(r_{t3}/r_3)]}, \text{ where } r_{t3} = \sqrt{(r_3^2 + r_{C1}^2)/2} \quad (111)$$

$$a_{s3,s8}(ij) = \frac{2r_3}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (112)$$

セル境界をまたがる右側隣接セル内の左側クラストとの伝熱面積およびそれと熱伝達係数との積は次のように定義する。

$$a_{s2(ij+1),s8(ij)} = 2r_{C1} / (r_{C1}^2 - r_{C0}^2) \quad (113)$$

$$(ha)_{s2(ij+1),s8(ij)} = \frac{a_{s2(ij+1),s8(ij)}}{r_{C1} [\kappa_s^{-1} \ln(r_{C1}/r_{t3}) + \kappa_f^{-1} \ln(r_{t6}/r_{C1})]} \quad (114)$$

右側隣接セルに左側管壁が存在する場合 ($NCANL(IJ+1) > 0$) にも考え方は全く同じであり、添字が異なるだけで全く同じ定式化を用いる。

4.7.3 ケース 8c (管壁が厚く、クラストが存在しない場合)

管壁が厚い場合 ($W_{RCW} \leq 6\delta_s$) には、管壁の両側に表面ノードを設定する。このとき、セル間の結合を実現するため、その一方には必ず隣接セルに存在するものとする。ここで、表面ノードが存在しないか、または、薄い場合には、その厚さが $2\delta_s$ となるように、内部ノードの質量を分配してその厚さが $2\delta_s$ に等しくなるように rezoning を行なう。セル境界を越えて質量を移管する場合にはセル体積比を掛けて換算を行なう

(a) 平板体系の場合

隣接セルの左側管壁が存在する場合 ($NCANL(IJ+1) > 1$) の rezoning のアルゴリズムを以下に示す。

$$\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) = \frac{2\delta_s}{W_{LCW}} \left[\bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s9}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} \right] \quad (115)$$

$$\tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) = \frac{2\delta_s}{W_{LCW}} \left[\bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} + \bar{\rho}_{s9}^n(ij+1) \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} + \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \right] \quad (116)$$

$$\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1) = \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s9}^n(ij+1) + \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} - \tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) - \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} \quad (117)$$

$$\tilde{e}_{s5}^{n+1}(ij+1) = \begin{cases} e_{s5}^n(ij+1) & \text{if } \tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) < \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \\ \frac{\bar{\rho}_{s8}^n(ij+1)e_{s5}^n(ij+1) + [\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) - \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1)]e_{s6}^n(ij+1)}{\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij)} & \text{if } \tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) \geq \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \end{cases} \quad (118)$$

$$\tilde{e}_{S7}^{n+1}(ij) = \begin{cases} e_{S7}^n(ij) & \text{if } \tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) < \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \\ \frac{\bar{\rho}_{s10}^n(ij)e_{S7}^n(ij) + [\tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) - \bar{\rho}_{s10}^n(ij)]e_{S6}^n(ij+1)}{\tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij)} & \text{if } \tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) \geq \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \end{cases} \quad (119)$$

$$\tilde{e}_{S6}^{n+1}(ij+1) = \begin{cases} e_{S6}^n(ij+1) & \text{if } \tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) \geq \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \text{ and } \tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) \geq \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \\ \frac{\bar{\rho}_{s9}^n(ij+1)e_{S6}^n(ij+1) - [\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) - \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1)]e_{S6}^n(ij+1) - [\tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) - \bar{\rho}_{s10}^n(ij)]e_{S7}^n(ij)}{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1)} & \text{if } \tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) \geq \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \text{ and } \tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) < \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \\ \frac{\bar{\rho}_{s9}^n(ij+1)e_{S6}^n(ij+1) - [\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) - \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1)]e_{S5}^n(ij+1) - [\tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) - \bar{\rho}_{s10}^n(ij)]e_{S6}^n(ij+1)}{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1)} & \text{if } \tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) < \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \text{ and } \tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) \geq \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \\ \frac{\bar{\rho}_{s9}^n(ij+1)e_{S6}^n(ij+1) - [\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) - \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1)]e_{S5}^n(ij+1) - [\tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) - \bar{\rho}_{s10}^n(ij)]e_{S7}^n(ij)}{\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1)} & \text{if } \tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) < \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) \text{ and } \tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) < \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \end{cases} \quad (120)$$

この場合、両側に表面ノードが置かれるため、伝熱面積は次のようになる。

$$a_{LCW}(ij+1) = a_{LCW}^i(ij+1), \text{ for } S5, \text{ and} \quad (121)$$

$$a_{RCW}(ij) = a_{LCW}^i(ij+1) \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}}, \text{ for } S7 \quad (122)$$

二つの表面ノードの熱伝達係数は次式で計算する。

$$h_{S5}(ij+1) = \frac{2\kappa_s a_{LCW}(ij+1)}{\tilde{\alpha}_{S5}^{n+1}(ij+1)}, \text{ and } h_{S7}(ij) = \frac{2\kappa_s a_{RCW}(ij)}{\tilde{\alpha}_{S7}^{n+1}(ij)} \quad (123)$$

同様に、内部ノードの熱伝達係数は次式となる。

$$h_{S6}(ij+1) = \frac{2\kappa_s a_{LCW}(ij+1)}{\tilde{\alpha}_{S6}^{n+1}(ij+1)} \quad (124)$$

流体に接触するのは両側とも表面ノードであり、その流体への熱伝達係数は以下のようにになる。

$$h_{k2}(ij+1) = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1)c_{S5}(ij+1)}{\Delta t a_{LCW}(ij+1)}, h_{S5}(ij+1) \right] \quad (125)$$

$$h_{k3}(ij) = \min \left[\frac{\tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij)c_{S7}(ij)}{\Delta t a_{RCW}(ij)}, h_{S7}(ij) \right] \quad (126)$$

構造物—構造物間熱伝達係数も以上の式から直接計算できる。ただし、セル間の熱伝達となる組み合わせについては、セル体積比による換算が必要である。

$$h_{s5,s6}(ij+1) = \frac{h_{s5}(ij+1)h_{s6}(ij+1)}{h_{s5}(ij+1) + h_{s6}(ij+1)} \quad (127)$$

$$(ha)_{s7(ij),s6(ij+1)} = \frac{a_{LCW}(ij+1)h_{s6}(ij+1)h_{s7}(ij)}{h_{s6}(ij+1) + h_{s7}(ij)} \quad (128)$$

以上の定式化で、自己セルの右側管壁が存在する場合 ($NCANR(IJ) > 0$) にも全く同様のアルゴリズムで rezoning を行い、伝熱表面積および熱伝達係数を計算する。

(b) 円筒体系の場合

円筒体系を用いる場合、平板体系におけるマクロ密度を次式で置き換えるだけで良い。

$$\tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) = \frac{1}{v_s} \frac{r_5^2 - r_4^2}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad (129)$$

$$\tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) = \frac{1}{v_s} \frac{r_2^2 - r_{C1}^2}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} \quad (130)$$

$$\tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1) = \frac{1}{v_s} \frac{r_4^2 - r_2^2}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad (131)$$

ここで、 r_{c1} および r_{c2} はセル $ij+1$ の左側および右側境界をそれぞれ表しており、 r_5 、 r_4 および r_2 は次式で計算される。

$$r_5 = r_{C1} + W_{LCW}, \quad r_4 = r_5 - 2\delta_s \quad \text{and} \quad r_2 = r_{C1} + 2\delta_s \quad (132)$$

管壁の表面積は次のようになる。

$$a_{LCW}(ij+1) = \frac{2r_5}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad \text{for S5, and} \quad (133)$$

$$a_{RCW}(ij) = \frac{2r_{C1}}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad \text{for S7} \quad (134)$$

また、両側の表面ノードの熱伝達係数は次式で与えられる。

$$h_{s5}(ij+1) = \frac{\kappa_s}{r_5 \ln(r_5/r_{t5})}, \quad \text{and} \quad h_{s7}(ij) = \frac{\kappa_s}{r_{C1} \ln(r_{C1}/r_{t2})} \quad (135)$$

ただし、 r_{t5} および r_{t2} は次式である。

$$r_{t5} = \sqrt{(r_5^2 + r_4^2)/2} \quad \text{and} \quad r_{t2} = \sqrt{(r_{C1}^2 + r_2^2)/2} \quad (136)$$

流体と接触する構造材側熱伝達係数は平板体系と同じ式が用いられるが、構造材間の熱伝達係数および伝熱面積は次式で計算される。

$$h_{S5,S6}(ij+1) = \frac{\kappa_s}{r_4 [\ln(r_4/r_{t4}) + \ln(r_{t5}/r_4)]}, \text{ where } r_{t4} = \sqrt{(r_4^2 + r_2^2)/2} \quad (137)$$

$$a_{S7(ij),S6(ij+1)}(ij+1) = \frac{2r_2}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad (138)$$

また、セルをまたがるノード間の熱伝達係数と伝熱面積の積は次式で求められる。

$$a_{S5(ij+1),S6(ij+1)}(ij+1) = \frac{2r_4}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad (139)$$

$$(ha)_{S7(ij),S6(ij+1)} = \frac{a_{S7(ij),S6(ij+1)}}{r_2 [\kappa_s^{-1} \ln(r_2/r_{t2}) + \kappa_s^{-1} \ln(r_{t4}/r_2)]} \quad (140)$$

自己セルに右側管壁が存在する場合 ($NCANR(IJ) > 0$) にも考え方は全く同じであり、添字が異なるだけで全く同じ定式化を用いる。

4.7.4 ケース 8c' (厚い管壁を多ノード化する場合)

前節の内部ノードを多ノード化する場合、 L 番目のノードは前タイムステップのノード幅 D_{LCWP} との差を考慮する必要がある。まず、前タイムステップと更新されたタイムステップにおける各ノードの長さを以下のように定義する。

$$r_{LCWI,m}^n = m \times D_{LCWP}(IJ+1) \quad \text{for } m = 2 \sim NLCWP(IJ+1)+1 \quad (141)$$

$$\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} = L \times D_{LCWI}(IJ+1) \quad \text{for } L = 2 \sim NLCWI(IJ+1)+1 \quad (142)$$

(a) 平板体系の場合

$$\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1) = \tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1) \frac{D_{LCWI}(ij+1)}{W_{LCW} - \tilde{\rho}_{s8}^{n+1}(ij+1) \nu_s / a_{LCW} - \tilde{\rho}_{s10}^{n+1}(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} \nu_s / a_{RCW}} \quad (143)$$

$$\begin{aligned}
 & \tilde{e}_{LCW,L}^{n+1} \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & e_{S7}^n(ij) \quad \text{if } \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \leq r_{LCWI,1}^n \left(= \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} \nu_s / a_{RCW} \right) \\
 & \left[\frac{\bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} e_{S7}^n(ij) \frac{r_{LCWI,1}^n - \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1}}{r_{LCWI,1}^n} + \bar{\rho}_{LCWI,1}^n(ij+1) e_{LCWI,1}^n(ij+1) \frac{\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} - r_{LCWI,1}^n}{r_{LCWI,2}^n - r_{LCWI,1}^n} \right] \\
 & \quad \frac{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)}{\quad} \quad \text{if } r_{LCWI,1}^n < \tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} \leq r_{LCWI,2}^n \\
 & \left[\frac{\bar{\rho}_{LCWI,m-1}^n(ij+1) e_{LCWI,m-1}^n(ij+1) \frac{r_{LCWI,m}^n - \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1}}{r_{LCWI,m}^n - r_{LCWI,m-1}^n} + \bar{\rho}_{LCWI,m}^n(ij+1) e_{LCWI,m}^n(ij+1) \frac{\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} - r_{LCWI,m}^n}{r_{LCWI,m+1}^n - r_{LCWI,m}^n} \right] \\
 & \quad \frac{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)}{\quad} \\
 & \quad \text{if } r_{LCWI,2}^n < \tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} \leq r_{LCWI,NLCWP(ij+1)+1}^n \\
 & \left[\frac{\bar{\rho}_{LCWI,m-1}^n(ij+1) e_{LCWI,m-1}^n(ij+1) \frac{r_{LCWI,m}^n - \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1}}{r_{LCWI,m}^n - r_{LCWI,m-1}^n} + \bar{\rho}_{LCWI,m}^n(ij+1) e_{LCWI,m}^n(ij+1) \frac{\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} - r_{LCWI,m}^n}{r_{LCWI,m+1}^n - r_{LCWI,m}^n} \right] \\
 & \quad \frac{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)}{\quad} \\
 & \quad \text{if } \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \leq r_{LCWI,NLCWP(ij+1)+1}^n < \tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} \\
 & e_{S5}^n(ij+1) \quad \text{if } r_{LCWI,NLCWP(ij+1)+1}^n < \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1}
 \end{aligned} \right. \tag{144}
 \end{aligned}$$

$$h_{LCWI,L}(ij+1) = \frac{2\kappa_s(ij+1)}{D_{LCWI}(ij+1)} \tag{145}$$

$$h_{(LCWI,L),(LCWI,L-1)}(ij+1) = \frac{h_{LCWI,L-1}(ij+1)h_{LCWI,L}(ij+1)}{h_{LCWI,L-1}(ij+1) + h_{LCWI,L}(ij+1)} \tag{146}$$

(b) 円筒体系の場合

$$\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1) = \tilde{\rho}_{s9}^{n+1}(ij+1) \frac{r_{LCWI,L+1}^{n+1\ 2} - r_{LCWI,L}^{n+1\ 2}}{r_4^2 - r_2^2} \quad (147)$$

$$\tilde{e}_{LCW,L}^{n+1} = \left\{ \begin{array}{l} e_{S7}^n(ij) \quad \text{if } \tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} \leq r_{LCWI,1}^n \left(= \bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} v_s / a_{RCW} \right) \\ \left[\bar{\rho}_{s10}^n(ij) \frac{V_{ij}}{V_{ij+1}} e_{S7}^n(ij) \frac{r_{LCWI,1}^{n\ 2} - \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1\ 2}}{r_{LCWI,1}^{n\ 2} - r_{C1}^2} \right. \\ \left. + \bar{\rho}_{LCWI,1}^n(ij+1) e_{LCWI,1}^n(ij+1) \frac{\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1\ 2} - r_{LCWI,1}^{n\ 2}}{r_{LCWI,2}^{n\ 2} - r_{LCWI,1}^{n\ 2}} \right] \\ \quad \frac{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)}{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)} \quad \text{if } r_{LCWI,1}^n < \tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} \leq r_{LCWI,2}^n \\ \left[\bar{\rho}_{LCWI,m-1}^n(ij+1) e_{LCWI,m-1}^n(ij+1) \frac{r_{LCWI,m}^{n\ 2} - \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1\ 2}}{r_{LCWI,m}^{n\ 2} - r_{LCWI,m-1}^{n\ 2}} \right. \\ \left. + \bar{\rho}_{LCWI,m}^n(ij+1) e_{LCWI,m}^n(ij+1) \frac{\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1\ 2} - r_{LCWI,m}^{n\ 2}}{r_{LCWI,m+1}^{n\ 2} - r_{LCWI,m}^{n\ 2}} \right] \\ \quad \frac{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)}{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)} \\ = \left\{ \begin{array}{l} \text{if } r_{LCWI,2}^n < \tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} \leq r_{LCWI,NLCWP(ij+1)+1}^n \\ \left[\bar{\rho}_{LCWI,m-1}^n(ij+1) e_{LCWI,m-1}^n(ij+1) \frac{r_{LCWI,m}^{n\ 2} - \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1\ 2}}{r_{LCWI,m}^{n\ 2} - r_{LCWI,m-1}^{n\ 2}} \right. \\ \left. + \bar{\rho}_{s8}^n(ij+1) e_{S5}^n(ij+1) \frac{\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1\ 2} - r_{LCWI,m}^{n\ 2}}{r_{LCWI,m+1}^{n\ 2} - r_{LCWI,m}^{n\ 2}} \right] \\ \quad \frac{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)}{\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}(ij+1)} \\ \text{if } \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \leq r_{LCWI,NLCWP(ij+1)+1}^n < \tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} \\ e_{S5}^n(ij+1) \quad \text{if } r_{LCWI,NLCWP(ij+1)+1}^n < \tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1} \end{array} \right. \end{array} \quad (148)$$

$$h_{LCWI,L}(ij+1) = \frac{\kappa_s(ij+1)}{\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} \ln(\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1}/r_{LCWI,L})}, \text{ where } r_{LCWI,L} = \sqrt{(\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1})^2 + (\tilde{r}_{LCWI,L}^{n+1})^2}/2 \quad (149)$$

$$h_{(LCWI,L),(LCWI,L+1)} = \frac{1}{\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1} [\kappa_s^{-1} \ln(r_{LCWI,L+1}/\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1}) + \kappa_s^{-1} \ln(\tilde{r}_{LCWI,L+1}^{n+1}/r_{LCWI,L})]} \quad (150)$$

4.7.5 ケース 8d（管壁が厚く、クラストが存在する場合）

このケースの基本的な考え方は、ケース 8 c とケース 8 b の組み合わせである。すなわち、管壁についてはケース 8 c と同様の手順で rezoning を行い、管壁成分（3 層）の熱伝達係数を計算する。クラストについてはケース 8 b と同様に、薄いか厚いかの判定を行い、同様の設定を行う。

(a) 平板体系の場合

クラストの熱伝達係数は次式で表される。

$$h_{s2}(ij+1) = \frac{2\kappa_f a_{LCW}(ij+1)}{\alpha_{s2}^n(ij+1)}, \text{ and } h_{s3}(ij) = \frac{2\kappa_f a_{RCW}(ij)}{\alpha_{s3}^n(ij)} \quad (151)$$

この場合、以下のようなクラストー管壁間熱伝達係数が追加される。

$$h_{s2,s5}(ij+1) = \frac{h_{s2}(ij+1)h_{s5}(ij+1)}{h_{s2}(ij+1) + h_{s5}(ij+1)}, \text{ and } h_{s3,s7}(ij) = \frac{h_{s3}(ij)h_{s7}(ij)}{h_{s3}(ij) + h_{s7}(ij)} \quad (152)$$

右側隣接セルに左側クラストが存在する場合（ $NF2(ij+1) > 1$ ）、流体はクラストと接触するので、構造材側熱伝達係数は次式となる。

$$h_{k2}(ij+1) = \min \left[\frac{[\bar{\rho}_{s3}^{n+1}(ij+1) + \bar{\rho}_{s4}^{n+1}(ij+1)]c_{s2}(ij+1)}{\Delta ta_{LCW}(ij+1)}, h_{s2}(ij+1) \right] \quad (153)$$

また、自己セルに右側クラストが存在する場合（ $NF3(ij) > 1$ ）、構造材側熱伝達係数は次式となる。

$$h_{k3}(ij) = \min \left[\frac{[\bar{\rho}_{s5}^{n+1}(ij) + \bar{\rho}_{s6}^{n+1}(ij)]c_{s3}(ij)}{\Delta ta_{RCW}(ij)}, h_{s3}(ij) \right] \quad (154)$$

(b) 円筒体系の場合

円筒体系の場合も平板体系と同様である。クラストの熱伝達係数は次式で表される。

$$h_{s2}(ij+1) = \frac{\kappa_f}{r_6 \ln(r_6/r_{t6})} \text{ and } h_{s3}(ij) = \frac{\kappa_f}{r_1 \ln(r_{t1}/r_1)} \quad (155)$$

ただし、各半径は次式で与えられる。

$$r_6 = \sqrt{r_{C1}^2 + (r_{C2}^2 - r_{C1}^2) [\alpha_{S2}^n(ij+1) + \tilde{\alpha}_{S5}^{n+1}(ij+1) + \tilde{\alpha}_{S6}^{n+1}(ij+1)]}, \quad r_5 = r_{C1} + W_{LCW}$$

$$r_{t6} = \sqrt{(r_5^2 + r_6^2)/2}, \quad r_1 = \sqrt{r_{C0}^2 + (r_{C1}^2 - r_{C0}^2) [1 - \alpha_{S3}^n(ij)]}, \quad \text{and} \quad r_{t1} = \sqrt{(r_1^2 + r_{C1}^2)/2} \quad (156)$$

この場合、流体はクラストと接触しているため、構造材側熱伝達係数は平板体系の場合と同様に与えられるが、伝熱面積は次式となる。

$$a_{LCW}(ij+1) = \frac{2r_6}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad \text{and} \quad a_{RCW}(ij) = \frac{2r_1}{r_{C1}^2 - r_{C0}^2} \quad (157)$$

また、以下のようなクラストー管壁間熱伝達係数が定義される必要がある。

$$h_{S2,S5}(ij+1) = \frac{1}{r_5 [\kappa_f^{-1} \ln(r_{t6}/r_5) + \kappa_s^{-1} \ln(r_5/r_{t5})]} \quad (158)$$

$$h_{S3,S7}(ij) = \frac{1}{r_{C1} [\kappa_f^{-1} \ln(r_{C1}/r_{t1}) + \kappa_s^{-1} \ln(r_{t2}/r_{C1})]} \quad (159)$$

$$a_{S2,S5}(ij+1) = 2r_5 / (r_{C2}^2 - r_{C1}^2) \quad (160)$$

$$a_{S3(ij),S7(ij)}(ij+1) = \frac{2r_{C1}}{r_{C2}^2 - r_{C1}^2} \quad (161)$$

ただし、各半径は次式である。

$$r_{t5} = \sqrt{(r_4^2 + r_5^2)/2}, \quad r_{t2} = \sqrt{(r_2^2 + r_{C1}^2)/2}, \quad r_4 = r_5 - 2\delta_s \quad \text{and} \quad r_2 = r_{C1} + 2\delta_s \quad (162)$$

4.8 構造材の体積率

構造材配位が定められてから、全構造材体積率が EOS ルーチンで計算される。

$$\begin{aligned} \alpha_S = & \alpha_{\text{int}} + [\bar{\rho}_{s1} + \bar{\rho}_{s2}] v_{s1} + [\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4}] v_{s2} + [\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6}] v_{s3} + \bar{\rho}_{s7} v_{s4} + \bar{\rho}_{s12} v_{s9} \\ & + \bar{\rho}_{s8}(ij) v_{s5}(ij) H[NCANL(ij)] + \bar{\rho}_{s9}(ij) v_{s6}(ij) \\ & + \bar{\rho}_{s10}(ij) v_{s7}(ij) H[NCANR(ij)] + \bar{\rho}_{s11}(ij) v_{s8}(ij) \\ & + \bar{\rho}_{s8}(ij+1) v_{s5}(ij+1) H[1 - NCANL(ij+1)] \frac{V_{ij+1}}{V_{ij}} \\ & + \bar{\rho}_{s10}(ij-1) v_{s7}(ij-1) H[1 - NCANR(ij-1)] \frac{V_{ij-1}}{V_{ij}} \\ & + \alpha_{nf,PIN} + \alpha_{nf,LCW} + \alpha_{nf,RCW} \end{aligned} \quad (163)$$

ここで、変数は NCANL および NCANR は 4.2 節で定義される。 $H(x)$ はヘビサイド関数で、次式の関係がある。

$$H(x) = 1, \text{ if } x > 0, \text{ and} \quad (164)$$

$$H(x) = 0, \text{ if } x \leq 0 \quad (165)$$

本式の最初の 4 項は、燃料内部ノードを含む燃料体積率および左右のクラスト体積率を表している。管壁の体積率はやや複雑な定式化がなされている。4.3 節で述べたように、二つのセルが結合したとき、あるセルの管壁表面ノードのマクロ密度はその隣接セルから移管されるが、この表面ノードは構造材体積率と表面積を保存するため、元のセルに戻されねばならない。すでに述べたように、質量保存のためにセル体積比を掛けている。よって、上式はその管壁表面のセットオーバーのロジックを含んでいる。流路の体積率は SIMMER-III/IV では重要な変数であり、 $(1 - \alpha_s)$ で定義される。

4.9 水力等価直径

一般に、流路の水力等価直径は次式で定義される。

$$D_h = \frac{4 \times [\text{Flow area}]}{[\text{wetted perimeter}]} = \frac{4A_{\text{flow}}}{P_{\text{wet}}} \quad (166)$$

単位体積当たりの流路面積 (flow area) および濡れぶち長さ (wetted perimeter) は

$$A_{\text{flow}} = [1 - \alpha_s] V, \text{ and} \quad (167)$$

$$P_{\text{wet}} = [a_{\text{pin}} + a_{\text{LCW}} + a_{\text{RCW}}] V \quad (168)$$

で定義されるため、結局、水力等価直径は次式のように表される。

$$D_h = \frac{4(1 - \alpha_s)}{a_{\text{pin}} + a_{\text{LCW}} + a_{\text{RCW}}} \quad (169)$$

ここで、 a_{pin} 、 a_{LCW} および a_{RCW} は前節までに計算された単位体積当たりの各構造材表面積である。なお、メッシュセルに構造材が存在しない場合の水力等価直径は、 1×10^{20} という大きな値が設定される。オプションとして、セル幅 ΔR に基づいて定義することも可能である。

$$D_h = 4(1 - \alpha_s) \Delta R \quad (170)$$

大きなプール形状については、そのプールの外側セルの水力等価直径の定義には追加的な検討が必要である。前述の手順に従えば、構造材のないセルには水力等価直径は大きな値が代入される一方で、構造壁のあるセルにはそのセル内の構造材体積率から計算される。構造材体積率 α_s はセル体積に依存するから、その直径はセルサイズ依存となり、やや恣意的に決められてしまう。そのため、ユーザー入力により水力等価直径を陽に定義できるオプションがある。

また、メッシュセル内の流動様式の選択、すなわち、プール流かチャンネル流かを決めるのは

水力等価直径である。水力等価直径 D_h が入力で与える閾値 $D_{h,pool}$ より大きい場合、そのセルの流動様式はプール流とみなされる。他方、 $D_h \leq D_{h,pool}$ の場合、そのセルはチャンネル流とみなされる。この入力変数のデフォルト値は $D_{h,pool} = 1.0$ である。

5 集合体管壁の熱伝達モデル

5.1 全体概要

ここでは、構造材場が関係する一連の熱伝達の過程を記述するモデルを定式化する。構造材に結合するクラスト燃料もここで取り扱われる。構造材表面と流体との間の熱移行については流体力学部の非平衡溶融／固化モデル⁸⁾で記述されるから、ここでは、集合体管壁内の熱伝導のみを取り扱う。ただし、管壁が薄くて、かつクラストが存在しない場合には、管壁内部の熱伝達の計算を行なう必要はないので、熱計算上は以下の3種の状況に大別される。

- ・単独の管壁（クラスト有りまたは無し）
- ・隣接セルと結合された薄い管壁（クラスト有り）
- ・隣接セルと結合された厚い管壁（クラスト有りまたは無し）

本章では、左側管壁のみを対象として定式化を行なう。右側管壁についても取り扱いは全く同様であるので、省略する。また、ここでは、平板体系の場合のみを記す。円筒体系の場合は構造材－構造材間熱伝達係数を a_{LCW} から $a_{Sm,Sn}$ に置換するのみで同じ定式化が適用できる。

なお、流体と接触している管壁ノードまたはクラストは、流体との間の熱および質量移行の計算により、そのマクロ密度および内部エネルギーが更新されている。したがって、管壁熱伝達モデルでは、この更新された物理量を用いて、流体との直接の結合は行なわずに内部の熱伝達を陰的に解く。

5.2 単独の管壁

管壁はその厚みによって1ノードか2ノードで表されるが、クラストの存在を考慮することによって、以下の3種の状況がある。なお、管壁内部は多ノード化できる。

5.2.1 ケース1（クラストの無い厚い管壁）

この場合、管壁には表面ノードおよび内部ノードがある。表面ノードは流体場と接触するため、流体－構造材間熱伝達により表面ノードのマクロ密度および比内部エネルギーは更新されたものである。この熱伝達の微分方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{s8} e_{s5}}{\partial t} = a_{LCW} h_{s5,s6} (\tilde{T}_{s6}^{n+1} - \tilde{T}_{s5}^{n+1}) \quad (171)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{s6}}{\partial t} = - \frac{\partial \bar{\rho}_{s8} e_{s5}}{\partial t} \quad (172)$$

5.2.2 ケース2（クラストの有る薄い管壁）

このケースでは、管壁は内部ノードだけでモデル化され、ケース1と同様に定式化される。前式の表面ノードをクラストに置換することによって、以下のような微分方程式が得られる。

$$\frac{\partial (\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4}) e_{s2}}{\partial t} = a_{LCW} h_{s2,s6} (\tilde{T}_{s6}^{n+1} - \tilde{T}_{s2}^{n+1}) \quad (173)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{s6}}{\partial t} = \frac{\partial (\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4}) e_{s2}}{\partial t} \quad (174)$$

5.2.3 ケース 3（クラストの有る厚い管壁）

同様に、構造材 3 層に対する熱伝達の式は次のようになる。

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})e_{s2}}{\partial t} = a_{LCW} h_{s2,s5} (\tilde{T}_{s5}^{n+1} - \tilde{T}_{s2}^{n+1}) \quad (175)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{s6}}{\partial t} = a_{LCW} h_{s5,s6} (\tilde{T}_{s5}^{n+1} - \tilde{T}_{s6}^{n+1}) \quad (176)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{s8} e_{s5}}{\partial t} = -\frac{\partial(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})e_{s2}}{\partial t} - \frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{s6}}{\partial t} \quad (177)$$

5.2.4 ケース 4（厚い管壁を多ノード化する場合）

多ノード化された管壁内部の L 番目のノードに対して、微分方程式が拡張される。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{LCW,L} e_{LCW,L}}{\partial t} = -a_{LCW} h_{(LCW,L),(LCW,L+1)} (\tilde{T}_{LCW,L}^{n+1} - \tilde{T}_{LCW,L+1}^{n+1}) \quad \text{for } L = 1 \quad (178)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}_{LCW,L} e_{LCW,L}}{\partial t} = & a_{LCW} h_{(LCW,L-1),(LCW,L)} (\tilde{T}_{LCW,L-1}^{n+1} - \tilde{T}_{LCW,L}^{n+1}) \\ & - a_{LCW} h_{(LCW,L),(LCW,L+1)} (\tilde{T}_{LCW,L}^{n+1} - \tilde{T}_{LCW,L+1}^{n+1}) \quad \text{for } L = 2 \sim N_{LCWI} \end{aligned} \quad (179)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{LCW,L} e_{LCW,L}}{\partial t} = a_{LCW} h_{(LCW,L-1),(LCW,L)} (\tilde{T}_{LCW,L-1}^{n+1} - \tilde{T}_{LCW,L}^{n+1}) \quad \text{for } L = N_{LCWI} + 1 \quad (180)$$

ただし、ノード（NLCWI+1）は表面ノードに相当する。

5.2.5 計算方法

単独の管壁の場合は 2 種の微分方程式に分けられる。ケース 1 とケース 2 では、2 つの未知数をもった方程式で表される。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_1 e_1}{\partial t} = a h_{1,2} (\tilde{T}_2^{n+1} - \tilde{T}_1^{n+1}) \quad (181)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_2 e_2}{\partial t} = a h_{1,2} (\tilde{T}_1^{n+1} - \tilde{T}_2^{n+1}) \quad (182)$$

同様に、ケース 3 の場合、次式で簡略化される。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_1 e_1}{\partial t} = a h_{1,2} (\tilde{T}_2^{n+1} - \tilde{T}_1^{n+1}) \quad (183)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_2 e_2}{\partial t} = a h_{1,2} (\tilde{T}_1^{n+1} - \tilde{T}_2^{n+1}) + a h_{2,3} (\tilde{T}_3^{n+1} - \tilde{T}_2^{n+1}) \quad (184)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_3 e_3}{\partial t} = a h_{2,3} (\tilde{T}_2^{n+1} - \tilde{T}_3^{n+1}) \quad (185)$$

右辺に現れる温度は end-of-time-step 値であるから、陰的な解法が用いられる。end-of-time-step における温度はテーラー展開することにより次式で表現される。

$$\tilde{T}_{Sm}^{n+1} = T_{Sm}^n + \left(\frac{\partial T_{Sm}}{\partial e_{Sm}} \right)^n \Delta e_{Sm} \quad (186)$$

密度は一定であるから、ケース 1 およびケース 2 における微分方程式は、上式を代入することにより以下のように書き直すことができる。

$$\left[\bar{\rho}_1 + (ah)_{1,2} \Delta t \frac{\partial T_1}{\partial e_1} \right] \Delta e_1 - \left[(ah)_{1,2} \Delta t \frac{\partial T_2}{\partial e_2} \right] \Delta e_2 = (ah)_{1,2} \Delta t (T_2^n - T_1^n) \quad (187)$$

$$- \left[(ah)_{1,2} \Delta t \frac{\partial T_1}{\partial e_1} \right] \Delta e_1 + \left[\bar{\rho}_2 + (ah)_{1,2} \Delta t \frac{\partial T_2}{\partial e_2} \right] \Delta e_2 = (ah)_{1,2} \Delta t (T_1^n - T_2^n) \quad (188)$$

これは 2 つの未知数をもった 2 元 1 次方程式であり、容易に Δe_1 および Δe_2 は求められる。

同様に、ケース 3 においても

$$\left[\bar{\rho}_1 + (ah)_{1,2} \Delta t \frac{\partial T_1}{\partial e_1} \right] \Delta e_1 - \left[(ah)_{1,2} \Delta t \frac{\partial T_2}{\partial e_2} \right] \Delta e_2 = (ah)_{1,2} \Delta t (T_2^n - T_1^n) \quad (189)$$

$$- \left[(ah)_{1,2} \Delta t \frac{\partial T_1}{\partial e_1} \right] \Delta e_1 + \left[\bar{\rho}_2 + \{(ah)_{1,2} + (ah)_{2,3}\} \Delta t \frac{\partial T_2}{\partial e_2} \right] \Delta e_2 + \left[(ah)_{2,3} \Delta t \frac{\partial T_3}{\partial e_3} \right] \Delta e_3 \quad (190)$$

$$= \Delta t [(ah)_{1,2} (T_1^n - T_2^n) + (ah)_{2,3} (T_3^n - T_2^n)] \quad (191)$$

$$- \left[(ah)_{2,3} \Delta t \frac{\partial T_2}{\partial e_2} \right] \Delta e_2 + \left[\bar{\rho}_3 + (ah)_{2,3} \Delta t \frac{\partial T_3}{\partial e_3} \right] \Delta e_3 = (ah)_{2,3} \Delta t (T_2^n - T_3^n) \quad (192)$$

で記述され、これは 3 元 1 次方程式であり、容易に Δe_1 、 Δe_2 および Δe_3 は計算できる。

同様に、ケース 4 に管壁内の L 番目のノードに拡張すると、

$$\begin{aligned} & - \left[(ah)_{L-1,L} \Delta t \frac{\partial T_{L-1}}{\partial e_{L-1}} \right] \Delta e_{L-1} + \left[\bar{\rho}_L + \{(ah)_{L-1,L} + (ah)_{L,L+1}\} \Delta t \frac{\partial T_L}{\partial e_L} \right] \Delta e_L \\ & + \left[(ah)_{L,L+1} \Delta t \frac{\partial T_{L+1}}{\partial e_{L+1}} \right] \Delta e_{L+1} = \Delta t [(ah)_{L-1,L} (T_{L-1}^n - T_L^n) + (ah)_{L,L+1} (T_{L+1}^n - T_L^n)] \end{aligned} \quad (193)$$

が得られ、これは n 元 1 次方程式であり、ニュートン法で計算できる。また、比内部エネルギーは次のように簡単に更新される。

$$\tilde{e}_{Sm}^{n+1} = e_{Sm}^n + \Delta e_{Sm} \quad (194)$$

ここで、流体力学タイムステップは十分に小さいと考えられるため、ここでは反復計算は行なわない。

5.3 隣接セルと結合された薄い管壁（クラストあり）

薄い管壁は内部ノードのみで表される。この場合、セル内にクラストが必ず存在しなければならない。クラストがない場合は熱伝達計算は必要ない。以下の3ケースが考えられる。

5.3.1 ケース 1（隣接セルにクラストが無い場合）

隣接セルにはクラストがなく、管壁のある自己セルにはクラストがある場合で、これは 5.2.2 節のケースと全く同じである。

5.3.2 ケース 2（隣接セルにクラストが有り、自己セルに無い場合）

隣接セルにはクラストだけがある場合で、方程式は以下の形になる。

$$\left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6})e_{s3}}{\partial} \right]_{ij-1} = (ha)_{s3(ij-1),s6(ij)} (\tilde{T}_{s6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{s3(ij-1)}^{n+1}) \quad (195)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{s6}}{\partial} \right]_{ij} = - \left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6})e_{s3}}{\partial} \right]_{ij-1} \quad (196)$$

5.3.3 ケース 3（隣接セルと自己セルにクラストが有る場合）

隣接セルにはクラストだけがあり、管壁のある自己セルにもクラストがある場合で、3層の構造材に対する方程式が必要となる。

$$\left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})e_{s2}}{\partial} \right]_{ij} = (h_{s2,s6} a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{s6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{s2(ij)}^{n+1}) \quad (197)$$

$$\left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6})e_{s3}}{\partial} \right]_{ij-1} = (ha)_{s3(ij-1),s6(ij)} (\tilde{T}_{s6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{s3(ij-1)}^{n+1}) \quad (198)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{s6}}{\partial} \right]_{ij} = - \left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6})e_{s3}}{\partial} \right]_{ij-1} - \left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})e_{s2}}{\partial} \right]_{ij} \quad (199)$$

5.3.4 計算方法

ケース 1 およびケース 2 は 2 元 1 次方程式となり、ケース 3 は 3 元 1 次方程式となる。よって、5.2 節で示した計算方法が適用可能である。なお、隣接セルにおけるクラストのマクロ密度にはセル体積比を掛けることに留意しなければならない。

5.4 隣接セルと結合された厚い管壁（クラスト有りまたは無し）

管壁が厚い場合は、その両側には必ず表面ノードが存在し、クラストがある場合とない場合の両方がある。よって、4つのケースを考える必要がある。これに加えて、管壁内部は多ノード化できるが、定式化は 5.2.4 節と同じなので、省略する。

5.4.1 ケース 1（クラストが無い場合）

この場合、構造材 3 層に対して次の 3 つの式が立てられる。

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s10} e_{S7}}{\partial} \right]_{ij-1} = (ha)_{S7(ij-1), S6(ij)} (\tilde{T}_{S6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{S7(ij-1)}^{n+1}) \quad (200)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{S6}}{\partial} \right]_{ij} = - \left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s10} e_{S7}}{\partial} \right]_{ij-1} - \left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s8} e_{S5}}{\partial} \right]_{ij} \quad (201)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s8} e_{S5}}{\partial} \right]_{ij} = (h_{S5, S6} a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{S6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{S5(ij)}^{n+1}) \quad (202)$$

5.4.2 ケース 2（隣接セルにのみクラストが有る場合）

この場合、隣接セルにのみクラストが存在するから、構造材 4 層に対して定式化される。

$$\left[\frac{\partial (\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6}) e_{S3}}{\partial} \right]_{ij-1} = (h_{S3, S7} a_{RCW})_{ij-1} (\tilde{T}_{S7(ij-1)}^{n+1} - \tilde{T}_{S3(ij-1)}^{n+1}) \quad (203)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s10} e_{S7}}{\partial} \right]_{ij-1} = - \left[\frac{\partial (\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6}) e_{S3}}{\partial} \right]_{ij-1} + (ha)_{S7(ij-1), S6(ij)} (\tilde{T}_{S6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{S7(ij-1)}^{n+1}) \quad (204)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{S6}}{\partial} \right]_{ij} = (ha)_{S7(ij-1), S6(ij)} (\tilde{T}_{S7(ij-1)}^{n+1} - \tilde{T}_{S6(ij)}^{n+1}) - \left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s8} e_{S5}}{\partial} \right]_{ij} \quad (205)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s8} e_{S5}}{\partial} \right]_{ij} = (h_{S5, S6} a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{S6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{S5(ij)}^{n+1}) \quad (206)$$

5.4.3 ケース 3（自己セルにのみクラストが有る場合）

ケース 2 と同様に、4 層の構造材に対して式が立てられる。

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s10} e_{S7}}{\partial} \right]_{ij-1} = (ha)_{S7(ij-1), S6(ij)} (\tilde{T}_{S6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{S7(ij-1)}^{n+1}) \quad (207)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s9} e_{S6}}{\partial} \right]_{ij} = - \left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s10} e_{S7}}{\partial} \right]_{ij-1} + (h_{S5, S6} a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{S5(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{S6(ij)}^{n+1}) \quad (208)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_{s8} e_{S5}}{\partial} \right]_{ij} = (h_{S5, S6} a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{S6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{S5(ij)}^{n+1}) - \left[\frac{\partial (\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4}) e_{S2}}{\partial} \right]_{ij} \quad (209)$$

$$\left[\frac{\partial (\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4}) e_{S2}}{\partial} \right]_{ij} = (h_{S2, S5} a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{S5(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{S2(ij)}^{n+1}) \quad (210)$$

5.4.4 ケース 4（隣接セルと自己セルにクラストが有る場合）

3つの管壁ノードの両側にクラストが存在する場合で、構造材5層に対して方程式が必要になる。

$$\left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6})e_{s3}}{\partial} \right]_{ij-1} = (h_{s3,s7}a_{RCW})_{ij-1} (\tilde{T}_{s7(ij-1)}^{n+1} - \tilde{T}_{s3(ij-1)}^{n+1}) \quad (211)$$

$$\left[\frac{\partial\bar{\rho}_{s10}e_{s7}}{\partial} \right]_{ij-1} = - \left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s5} + \bar{\rho}_{s6})e_{s3}}{\partial} \right]_{ij-1} + (ha)_{s7(ij-1),s6(ij)} (\tilde{T}_{s6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{s7(ij-1)}^{n+1}) \quad (212)$$

$$\left[\frac{\partial\bar{\rho}_{s9}e_{s6}}{\partial} \right]_{ij} = (ha)_{s7(ij-1),s6(ij)} (\tilde{T}_{s7(ij-1)}^{n+1} - \tilde{T}_{s6(ij)}^{n+1}) + (h_{s5,s6}a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{s5(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{s6(ij)}^{n+1}) \quad (213)$$

$$\left[\frac{\partial\bar{\rho}_{s8}e_{s5}}{\partial} \right]_{ij} = (h_{s5,s6}a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{s6(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{s5(ij)}^{n+1}) - \left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})e_{s2}}{\partial} \right]_{ij} \quad (214)$$

$$\left[\frac{\partial(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})e_{s2}}{\partial} \right]_{ij} = (h_{s2,s5}a_{LCW})_{ij} (\tilde{T}_{s5(ij)}^{n+1} - \tilde{T}_{s2(ij)}^{n+1}) \quad (215)$$

5.4.5 計算方法

ケース 1 は前節と同様に計算される。ケース 2 とケース 3 も比内部エネルギーで展開すれば 4 元 1 次方程式が得られる。

$$\frac{\partial\bar{\rho}_1e_1}{\partial} = (ah)_{1,2} (\tilde{T}_2^{n+1} - \tilde{T}_1^{n+1}) \quad (216)$$

$$\frac{\partial\bar{\rho}_2e_2}{\partial} = (ah)_{1,2} (\tilde{T}_1^{n+1} - \tilde{T}_2^{n+1}) + (ah)_{2,3} (\tilde{T}_3^{n+1} - \tilde{T}_2^{n+1}) \quad (217)$$

$$\frac{\partial\bar{\rho}_3e_3}{\partial} = (ah)_{2,3} (\tilde{T}_2^{n+1} - \tilde{T}_3^{n+1}) + (ah)_{3,4} (\tilde{T}_4^{n+1} - \tilde{T}_3^{n+1}) \quad (218)$$

$$\frac{\partial\bar{\rho}_4e_4}{\partial} = (ah)_{3,4} (\tilde{T}_3^{n+1} - \tilde{T}_4^{n+1}) \quad (219)$$

ケース 4 についても、同様に 5 元 1 次方程式が得られる。

$$\frac{\partial\bar{\rho}_1e_1}{\partial} = (ah)_{1,2} (\tilde{T}_2^{n+1} - \tilde{T}_1^{n+1}) \quad (220)$$

$$\frac{\partial\bar{\rho}_2e_2}{\partial} = (ah)_{1,2} (\tilde{T}_1^{n+1} - \tilde{T}_2^{n+1}) + (ah)_{2,3} (\tilde{T}_3^{n+1} - \tilde{T}_2^{n+1}) \quad (221)$$

$$\frac{\partial\bar{\rho}_3e_3}{\partial} = (ah)_{2,3} (\tilde{T}_2^{n+1} - \tilde{T}_3^{n+1}) + (ah)_{3,4} (\tilde{T}_4^{n+1} - \tilde{T}_3^{n+1}) \quad (222)$$

$$\frac{\partial\bar{\rho}_4e_4}{\partial} = (ah)_{3,4} (\tilde{T}_3^{n+1} - \tilde{T}_4^{n+1}) + (ah)_{4,5} (\tilde{T}_5^{n+1} - \tilde{T}_4^{n+1}) \quad (223)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_5 e_5}{\partial \bar{a}} = (ah)_{4,5} (\tilde{T}_4^{n+1} - \tilde{T}_5^{n+1}) \quad (224)$$

ここで注意が必要なのは、隣接セルのマクロ密度のみならず構造材－構造材間熱伝達面積もセル体積比を乗ずることである。

以上で得られた4元および5元方程式は、典型的な3重対角行列システムであり、次式のように表される。

$$\left[\frac{\partial \bar{\rho}_m e_m}{\partial \bar{a}} \right] = (ha)_{m-1,m} (\tilde{T}_{m-1}^{n+1} - \tilde{T}_m^{n+1}) + (ha)_{m,m+1} (\tilde{T}_{m+1}^{n+1} - \tilde{T}_m^{n+1}) \quad (225)$$

すでに5.2.4節で示した End-of-time-step 温度 $\tilde{T}_{sm}^{n+1}$ を用いて展開すると、 Δe_m に対する3重対角行列システムの1式として

$$\begin{aligned} & - \left[(ah)_{m-1,m} \Delta t \frac{\partial T_{m-1}}{\partial e_{m-1}} \right] \Delta e_{m-1} + \left[\bar{\rho}_m + \{ (ah)_{m-1,m} + (ah)_{m,m+1} \} \Delta t \frac{\partial T_m}{\partial e_m} \right] \Delta e_m \\ & - \left[(ah)_{m,m+1} \Delta t \frac{\partial T_{m+1}}{\partial e_{m+1}} \right] \Delta e_{m+1} = \Delta t \left[(ah)_{m-1,m} (T_{m-1}^n - T_m^n) + (ah)_{m,m+1} (T_{m+1}^n - T_m^n) \right] \end{aligned} \quad (226)$$

が得られる。 Δe_m を解くことにより、 $\tilde{e}_m^{n+1}$ は次式で計算できる。

$$\tilde{e}_m^{n+1} = e_m^n + \Delta e_m \quad (227)$$

5.5 核加熱の取り扱い

核加熱により全成分の内部エネルギーが更新されるが、管壁内部の多ノード化された部分については、管壁内部ノードの内部エネルギーの更新分は均一に分配されると仮定して、次式で内部エネルギーを更新する。

$$\Delta = \tilde{e}_{s6}^{n+1} - \frac{\sum_{L=1}^{N_{LCWI}} (\tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1} \tilde{e}_{LCWI,L}^{n+1})}{\sum_{L=1}^{N_{LCWI}} \tilde{\rho}_{LCWI,L}^{n+1}} \quad (228)$$

$$\tilde{e}_{LCWI,L}^{n+1} = \tilde{e}_{LCWI,L}^{n+1} + \Delta \quad \text{for } L=1 \text{ to } N_{LCWI} \quad (229)$$

5.6 軸方向熱伝達の取り扱い

軸方向熱伝達により全成分の内部エネルギーが更新されるが、管壁内部の多ノード化された部分については、前節と同様に取り扱う。

6 集合体管壁の質量移行モデル

6.1 全体概要

SIMMER-III/IV では、様々な状況の質量移行過程をモデル化している。構造材表面と流体との界面で生じる非平衡溶融／固化による質量移行は流体力学部にて取り扱われる⁸⁾。本章では、非平衡溶融／固化モデルで取り扱っていない構造材に関連する質量移行形態、すなわち、平衡溶融／固化、固体構造材破損、液体場燃料からの FP ガス放出について記述する。

これらは流体力学アルゴリズムの中で独立に処理され、各モデル間のフィードバックは考慮されない。言い換えれば、これらの機構による質量およびエネルギーの更新はそれぞれ異なる質量移行過程で取り扱われることになる。構造材破損に伴う質量移行は流体力学アルゴリズムの最初で、具体的には構造材配位を更新する前に計算される。これは構造材破損が構造材の配位および流路形状（水力等価直径）に瞬時にかつ大きく影響を与えるからである。他方、平衡溶融／固化に伴う質量移行はセル内計算の最後で計算され、一連の熱伝達計算の後の各成分の熱的状态に基づいて相変化量が評価される。

6.2 平衡溶融／固化による質量移行

SIMMER-III/IV では、2種類の溶融／固化の質量移行過程をモデル化している。非平衡溶融／固化は2成分の界面における条件はある相変化条件を満たすかどうかで行なわれる。つまり、各成分のバルクエネルギーに関係なく、質量移行速度が界面における熱バランスに基づいて計算される。このことから、この過程は「非平衡」と呼ばれる。

流体力学部のセル内計算は「STEP 1」と呼ばれるモジュールで計算され、それは構造材破損、核加熱、非平衡の熱および質量移行、集合体管壁熱伝達などからなる。これらの一連の熱および質量移行過程において質量およびエネルギーが更新された結果、固体成分の内部エネルギーが solidus エネルギーより高く、あるいは、液体成分の内部エネルギーが liquidus エネルギーより低くなることもある。よって、STEP1 の最後で平衡溶融／固化が評価され、ある成分の比内部エネルギーがその成分の相遷移エネルギーを超える状態となった場合に平衡溶融／固化による沿う変化量が評価される。相変化する成分の質量は相遷移エネルギーになるように、すなわち、固体成分は solidus エネルギー、液体成分は liquidus エネルギーになるように成分の相変化量が決定される。このような処理は非構造材成分にも適用され、例えば、液体燃料と燃料粒子との間の平衡溶融／固化も同様に計算される⁸⁾。

まず、固体成分（クラスト燃料、集合体管壁、燃料粒子、チャンク燃料、スチール粒子）の平衡溶融／固化が評価される。その結果得られる液体状態が更新される。その後、液体成分（液体燃料、液体スチール）の平衡固化が取り扱われる。両過程が同時に生じる可能性の取り扱いは重要ではないと判断されるため、このような順番で計算することとしている。

6.2.1 クラスト燃料の平衡溶融

クラスト燃料の比内部エネルギーが solidus エネルギーを超える場合、クラスト燃料の一部は、残ったクラストのエネルギーが solidus となるように液体燃料に質量移行させる。左側クラスト燃料に対する質量およびエネルギーの式は次のようになる。

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})}{\partial t} = -\Gamma_{S2,L1}^{EQ} \quad (230)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})e_{s2}}{\partial t} = -\Gamma_{S2,L1}^{EQ} \max[e_{Liq,1}, e_{s2}^n] \quad (231)$$

ただし、平衡溶融による質量移行速度は以下で表される。

$$\Gamma_{S2,L1}^{EQ} = \min \left[-\frac{(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})}{\Delta t} \frac{e_{sol,1} - e_{s2}}{h_{f,1}}, \frac{(\bar{\rho}_{s3} + \bar{\rho}_{s4})}{\Delta t} \right] \quad (232)$$

ここで、 $h_{f,1}$ は燃料の溶融潜熱である。クラストが残存する場合には、そのエネルギーが solidus エネルギーになることを考慮してマクロ密度が計算される。質量移行は fertile/fissile の存在比に応じて生じるので、残されたクラストも同じ割合となる。なお、クラスト燃料中には FP ガスは存在しないため、燃料の質量移行に伴う FP ガスの移行は考慮する必要はない。また、平衡溶融で生じた液体燃料中にはガスは存在しない。

6.2.2 集合体管壁の平衡溶融

管壁もクラストと同様に、solidus エネルギーを超えたスチールは液体スチールに移行するものとする。移行しない残存管壁は solidus エネルギーで管壁にそのまま残る。この過程には、クラストに覆われた管壁も含まれ、このときクラスト下の管壁は条件を満たせば溶融可能であり、クラストを通じて液体スチールは液体場へ移行できるモデルにしている。これは実際の物理的状況としては、クラスト下での溶融スチールの流下とクラストの亀裂からの溶融スチールの流出あるいはポーラス状のクラストを通した溶融スチールの流出を想定している。

また、隣接セルに存在する表面ノードも取り扱われる。薄い管壁が隣接セルからの熱的負荷によって溶融する場合も、液体スチールは自分のセルに生じさせることになる。すなわち、平衡溶融に伴うセル間の質量移行は生じない。これは、物理的には厳密ではないが、薄い管壁は遅かれ早かれ破損することを考慮すれば、その影響は許容できるものと考えられる。

溶融する管壁成分 m に対する質量およびエネルギーの式は次のとおりである。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{sm}}{\partial t} = -\Gamma_{Sm,L2}^{EQ} \quad (233)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{sm} e_{sm})}{\partial t} = -\Gamma_{Sm,L2}^{EQ} \max[e_{Liq,2}, e_{sm}^n] \quad (234)$$

ただし、平衡溶融による質量移行速度は次式で表される。

$$\Gamma_{Sm,L2}^{EQ} = \min \left[-\frac{\bar{\rho}_{sm}}{\Delta t} \frac{e_{sol,2} - e_{sm}}{h_{f,2}}, \frac{\bar{\rho}_{sm}}{\Delta t} \right] \quad (235)$$

ここで、 $h_{f,2}$ はスチールの溶融潜熱である。質量移行速度はその計算タイムステップ内で可能な質量移行の最大値で制限される。

6.2.3 燃料粒子、チャンク燃料およびスチール粒子の平衡溶融

この場合も前述のケースと同様であり、燃料粒子およびスチール粒子に対する質量およびエネルギーの式は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{lm}}{\partial t} = -\Gamma_{Lm,L(m-3)}^{EQ} \quad (236)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{lm}e_{Lm})}{\partial t} = -\Gamma_{Lm,L(m-3)}^{EQ} \max[e_{Liq,(m-3)}, e_{Lm}^n] \quad (237)$$

ただし、 $m = 4$ は燃料、 $m = 5$ はスチールで、平衡溶融により質量移行速度は次式になる。

$$\Gamma_{Lm,L(m-3)}^{EQ} = \min \left[-\frac{\bar{\rho}_{lm}^n}{\Delta t} \frac{e_{Sol,(m-3)} - e_{Lm}^n}{h_{f,m-3}}, \frac{\bar{\rho}_{lm}^n}{\Delta t} \right] \quad (238)$$

同様に、燃料チャンクの溶融に対する質量およびエネルギーの式は以下である。

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{l9} + \bar{\rho}_{l10})}{\partial t} = -\Gamma_{L7,L1}^{EQ} \quad (239)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{l9} + \bar{\rho}_{l10})e_{L7}}{\partial t} = -\Gamma_{L7,L1}^{EQ} \max[e_{Liq,1}, e_{L7}^n] \quad (240)$$

ただし、質量移行速度は次式である。

$$\Gamma_{L7,L1}^{EQ} = \min \left[-\frac{(\bar{\rho}_{l9}^n + \bar{\rho}_{l10}^n)}{\Delta t} \frac{e_{Sol,1} - e_{L7}^n}{h_{f,1}}, \frac{(\bar{\rho}_{l9}^n + \bar{\rho}_{l10}^n)}{\Delta t} \right] \quad (241)$$

残存する固体粒子は solidus エネルギーとなるように質量は移行される。ここで、 $h_{f,m-3}$ は溶融潜熱である。fertile/fissile の分配も存在比に基づいて計算される。また、固体燃料粒子の溶融においては、固体粒子／チャンク中の FP ガスは液体燃料中の FP ガスに移行される。この際の質量移行は燃料の質量移行速度に比例して生じるものと仮定する。溶融に伴う FP ガスの蒸気場への放出については比較的放出時定数の短い液体燃料からの放出をモデル化していることにより十分に近似できるものと考えられる。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l12}}{\partial t} = -\Gamma_{l12,l11}^{EQ} \quad (242)$$

$$\Gamma_{l12,l11}^{EQ} = \Gamma_{L4,L1}^{EQ} \frac{\bar{\rho}_{l12}^n}{\bar{\rho}_{l5}^n + \bar{\rho}_{l6}^n} \quad (243)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l13}}{\partial t} = -\Gamma_{l13,l11}^{EQ} \quad (244)$$

$$\Gamma_{l13,l11}^{EQ} = \Gamma_{L7,L1}^{EQ} \frac{\bar{\rho}_{l13}^n}{\bar{\rho}_{l9}^n + \bar{\rho}_{l10}^n} \quad (245)$$

ここで、 $\Gamma_{L4,L1}^{EQ}$ および $\Gamma_{L7,L1}^{EQ}$ は、それぞれ前述で定義された燃料粒子および燃料チャンクの質量移行速度である。

6.2.4 固体の溶融による液体場の状態変化

固体成分の平衡溶融の結果、液体場の状態が変化するため、液体燃料および液体スチールのマクロ密度および比内部エネルギーを更新する。このうち、マクロ密度については、質量移行速度から直接更新される。エネルギーについては、液体燃料に対しては次式で更新される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho}_{l1} + \bar{\rho}_{l2})e_{L1}}{\partial t} = & \Gamma_{S2,L1}^{EQ} \max[e_{Li,1}, e_{S2}^n] + \Gamma_{S3,L1}^{EQ} \max[e_{Li,1}, e_{S3}^n] \\ & + \Gamma_{L4,L1}^{EQ} \max[e_{Li,1}, e_{L4}^n] + \Gamma_{L7,L1}^{EQ} \max[e_{Li,1}, e_{L7}^n] \end{aligned} \quad (246)$$

液体スチールについて、同様に次式で更新される。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l3} e_{L2}}{\partial t} = \sum_{m=5}^8 \Gamma_{Sm,L2}^{EQ} \max[e_{Li,2}, e_{Sm}^n] + \Gamma_{L5,L2}^{EQ} \max[e_{Li,2}, e_{L5}^n] \quad (247)$$

また、液体燃料中の FP ガスも液体燃料と共に次式で更新される。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l11}}{\partial t} = -\Gamma_{l12,l11}^{EQ} - \Gamma_{l13,l11}^{EQ} \quad (248)$$

6.2.5 液体燃料の平衡固化

液体燃料はクラストまたは固体粒子に固化する。固化によるクラスト形成については、非平衡の質量移行経路としてモデル化されている。したがって、燃料の平衡固化によって生じる質量移行の経路は固化粒子であると仮定する。液体燃料の質量およびエネルギーの式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{l1} + \bar{\rho}_{l2})}{\partial t} = -\Gamma_{L1,L4}^{EQ} \quad (249)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{l1} + \bar{\rho}_{l2})e_{L1}}{\partial t} = -\Gamma_{L1,L4}^{EQ} \min[e_{Sol,1}, e_{L1}^n] \quad (250)$$

ただし、平衡固化による質量移行速度は次式で表される。

$$\Gamma_{L1,L4}^{EQ} = \min \left[-\frac{(\bar{\rho}_{l1}^n + \bar{\rho}_{l2}^n) e_{Li,1} - e_{L1}^n}{\Delta t} \frac{1}{h_{f,1}}, \frac{(\bar{\rho}_{l1}^n + \bar{\rho}_{l2}^n)}{\Delta t} \right] \quad (251)$$

ここで、残存する液体燃料は liquidus エネルギーになるように質量移行される。また、fertile/fisile の分配も存在比に応じて行なう。固体燃料粒子のマクロ密度および比内部エネルギーは次式で計算される。

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{l5} + \bar{\rho}_{l6})}{\partial t} = \Gamma_{L1,L4}^{EQ} \quad (252)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_{l5} + \bar{\rho}_{l6})e_{L4}}{\partial t} = -\Gamma_{L1,L4}^{EQ} \min[e_{Sol,1}, e_{L4}^n] \quad (253)$$

また、燃料の質量移行に伴う FP ガスの移行についても、6.2.3 節および 6.2.4 節における FP ガスの質量保存式が用いられる。

6.2.6 液体スチールの平衡固化

燃料の場合と同様に、液体スチールの平衡固化としては固体粒子への移行をモデル化する。液体スチールの質量およびエネルギーの式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l3}}{\partial t} = -\Gamma_{L2,L5}^{EQ} \quad (254)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l3} e_{L2}}{\partial t} = -\Gamma_{L2,L5}^{EQ} \min[e_{Sol,2}, e_{L2}^n] \quad (255)$$

ただし、平衡固化による質量移行速度は次式で表される。

$$\Gamma_{L2,L5}^{EQ} = \min \left[\frac{\bar{\rho}_{l3}^n}{\Delta t} \frac{e_{Li,2} - e_{L2}^n}{h_{f,2}}, \frac{\bar{\rho}_{l3}^n}{\Delta t} \right] \quad (256)$$

残存する液体スチールは liquidus エネルギーである。固体粒子のマクロ密度および比内部エネルギーは次式で計算される。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l7}}{\partial t} = \Gamma_{L2,L5}^{EQ} \quad (257)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l7} e_{L5}}{\partial t} = \Gamma_{L2,L5}^{EQ} \min[e_{Sol,2}, e_{L2}^n] \quad (258)$$

計算オプションとして、スチール液膜の存在割合に応じて、液体スチールの被覆管および管壁表面への固化も考慮されている。スチールの平衡固化に対する質量およびエネルギーの式は次のとおりである。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l3}}{\partial t} = -\Gamma_{L2,L5}^{EQ} - \Gamma_{L2,S4}^{EQ} - \Gamma_{L2,S5}^{EQ} - \Gamma_{L2,S7}^{EQ} \quad (259)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l7}}{\partial t} = \Gamma_{L2,L5}^{EQ} \quad (260)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{Sm}}{\partial t} = \Gamma_{L2,Sm}^{EQ} \quad (261)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l3} e_{L2}}{\partial t} = -(\Gamma_{L2,L5}^{EQ} + \Gamma_{L2,S4}^{EQ} + \Gamma_{L2,S5}^{EQ} + \Gamma_{L2,S7}^{EQ}) \min[e_{Li,2}, e_{L2}^n] \quad (262)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{l7} e_{L5}}{\partial t} = \Gamma_{L2,L5}^{EQ} \min[e_{Sol,2}, e_{L5}^n] \quad (263)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{Sm} e_{Sm}}{\partial t} = \Gamma_{L2,Sm}^{EQ} \min[e_{Sol,2}, e_{Sm}^n] \quad (264)$$

ただし、 $m = 4$ は被覆管、 $m = 5$ は左側管壁表面、 $m = 7$ は右側管壁表面である。質量移行速度は次式である。

$$\Gamma_{L2,L5}^{EQ} = \min \left[\frac{\bar{\rho}_{l3}^n}{\Delta t} (1 - X_B) \frac{e_{Li,2} - e_{L2}^n}{h_{f,2}}, \frac{\bar{\rho}_{l3}^n}{\Delta t} (1 - X_B) \right] \quad (265)$$

$$\Gamma_{L2,Sm}^{EQ} = \min \left[\frac{\bar{\rho}_{l3}^n}{\Delta t} \frac{e_{Li,2} - e_{L2}^n}{h_{f,2}} \frac{a_{L2,Sm}}{\sum_m a_{L2,Sm}} X_B, \frac{\bar{\rho}_{l3}^n}{\Delta t} \frac{a_{L2,Sm}}{\sum_m a_{L2,Sm}} X_B \right] \quad (266)$$

ここで、 X_B は液体スチールの連続領域内の液体スチール割合を表しており、 $a_{L2,Sm}$ は液体スチール連続相と被覆管／左側管壁表面／右側管壁表面との間の接触面積を示す。

6.2.7 液体場燃料からの FP ガス放出

前節までに、燃料の平衡熔融／固化に伴う FP ガスの質量移行は記述されている。ここでは、液体場燃料から蒸気場への FP ガス放出の取り扱いについて述べる。この FP ガス放出に関するモデルは、入力で与えた放出時定数に基づく簡易モデルである。典型的な放出時定数（デフォルト値）は液体燃料および固体燃料粒子／チャンクに対してそれぞれ 10^{-3} および 10^{-1} 秒である。これは、十分に熔融した燃料からは FP ガスは極めて急速に開放されるが、部分的に熔融した燃料からはゆっくりと放出されるという一般的な理解に基づいて設定されたものである。放出速度は次式で計算される。

$$\Gamma_{l11,g5} = -\frac{\partial \bar{\rho}_{l11}}{\partial t} = \min \left[\frac{f_{l11,g5}}{\tau_{l11,g5}} \bar{\rho}_{l11}^n, \frac{\bar{\rho}_{l11}^n}{\Delta t} \right] \quad (267)$$

$$\Gamma_{l12,g5} = -\frac{\partial \bar{\rho}_{l12}}{\partial t} = \min \left[\frac{f_{l12,g5}}{\tau_{l12,g5}} \bar{\rho}_{l12}^n, \frac{\bar{\rho}_{l12}^n}{\Delta t} \right] \quad (268)$$

$$\Gamma_{l13,g5} = -\frac{\partial \bar{\rho}_{l13}}{\partial t} = \min \left[\frac{f_{l13,g5}}{\tau_{l13,g5}} \bar{\rho}_{l13}^n, \frac{\bar{\rho}_{l13}^n}{\Delta t} \right] \quad (269)$$

ここで、 $\tau_{l11,g5}$ 、 $\tau_{l12,g5}$ および $\tau_{l13,g5}$ は FP ガス放出時定数であり、 $f_{l11,g5}$ 、 $f_{l12,g5}$ および $f_{l13,g5}$ は入力で与える乗数である。したがって、放出後の液体場燃料中の FP ガスのマクロ密度は次式となる。

$$\bar{\rho}_{l11}^{n+1} = \bar{\rho}_{l11}^n - \Delta t \Gamma_{l11,g5} \quad (270)$$

$$\bar{\rho}_{l12}^{n+1} = \bar{\rho}_{l12}^n - \Delta t \Gamma_{l12,g5} \quad (271)$$

$$\bar{\rho}_{l13}^{n+1} = \bar{\rho}_{l13}^n - \Delta t \Gamma_{l13,g5} \quad (272)$$

一方、蒸気場の FP ガスのマクロ密度はガス放出の結果として

$$\bar{\rho}_{g5}^{n+1} = \bar{\rho}_{g5}^n + \Delta t (\Gamma_{l11,g5} + \Gamma_{l12,g5} + \Gamma_{l13,g5}) \quad (273)$$

となるが、これは蒸気混合物のエネルギー状態を変化させるため、エネルギーを更新する必要がある。放出されるガス温度と蒸気場の温度とが等しくないため平均操作が必要になるが、放出される FP ガスの温度は、液体燃料からの放出では T_{L1} 、固体粒子からの放出では T_{L4} 、燃料チャンクからの放出では T_{L7} であると仮定する。したがって、蒸気場比内部エネルギーは次式で計算される。

$$e_G^{n+1} = \frac{\sum_{m=1}^4 (\bar{\rho}_{Gm}^n e_{Gm}^n) + \Delta t [\Gamma_{l11,g5} e_{G4}(T_{L1}) + \Gamma_{l12,g5} e_{G4}(T_{L4}) + \Gamma_{l13,g5} e_{G4}(T_{L7})]}{\sum_{m=1}^4 \bar{\rho}_{Gm}^n + \Delta t [\Gamma_{l11,g5} + \Gamma_{l12,g5} + \Gamma_{l13,g5}]} \quad (274)$$

ここで、 $e_{G4}(T_{L1})$ は、放出される FP ガス温度（例えば T_{L1} ）に対応したガスの比内部エネルギー

で、EOS モデルにて理想気体に対する状態方程式から計算される。また、蒸気場温度は

$$\Delta e_G = \frac{\partial e_G}{\partial T_G} \Delta T_G \quad (275)$$

なる関係を用いて、次のような反復計算（Newton-Raphson 法）により評価し更新される。

$$T_G^{k+1} = T_G^k - \frac{e_G(T_G^k) - e_G^{k+1}}{\left(\frac{\partial e_G}{\partial T_G} \right)} \quad (276)$$

なお、構造材場および液体場に存在する FP ガスの内部エネルギーは蒸気場に放出された時点で考慮することになる。したがって、全エネルギーは蒸気場に放出された FP ガス分だけ増加し、保存されないことになる。ただし、構造材場および液体場におけるそのエネルギーは他の成分と比べて無視しうるほど小さく、現在の取り扱いは妥当なものと考えられる。

6.3 集合体管壁およびクラスト燃料の破損

6.3.1 集合体管壁の破損

集合体管壁の破損を予測する閾値は管壁内部ノードの溶融割合に基づく

$$\frac{e_{Sm} - e_{sol,2}}{e_{liq,2} - e_{sol,2}} \geq f_{CW}^i \quad (m=6 \text{ or } 8), \quad (277)$$

ここで、 f_{CW}^i は入力で与える閾値である。

管壁の一部は liquidus エネルギーで液体スチールへ移行する。

$$f_{CW} = \frac{e_{Sm} - e_{sol,2}}{e_{liq,2} - e_{sol,2}} \quad (278)$$

$$\bar{\rho}_{l3}^{n+1} = \bar{\rho}_{l3}^n + f_{CW} \bar{\rho}_{sm}^n \quad (279)$$

$$e_{L2}^{n+1} = \frac{\bar{\rho}_{l3}^n e_{L2}^n + f_{CW} \bar{\rho}_{sm}^n e_{Liq,2}}{\bar{\rho}_{l3}^{n+1}} \quad (280)$$

残存する管壁は solidus エネルギーでそのまま管壁として留まることもあるが、その一部は液体場のスチール粒子として放出されることがある。それは次式で定義される。

$$\tilde{\rho}_{l7}^{n+1} = \bar{\rho}_{l7}^n + (1 - f_{CW})(1 - X_{CW}) \bar{\rho}_{sm}^n \quad (281)$$

$$\tilde{e}_{L5}^{n+1} = \frac{\bar{\rho}_{l7}^n e_{L5}^n + (1 - f_c)(1 - X_{CW}) \bar{\rho}_{sm}^n e_{sol,2}}{\tilde{\rho}_{l7}^{n+1}} \quad (282)$$

$$\tilde{\rho}_{sm}^{n+1} = \bar{\rho}_{sm}^n - \tilde{\rho}_{l3}^{n+1} - \tilde{\rho}_{l7}^{n+1} \quad (283)$$

$$\tilde{e}_{Sm}^{n+1} = e_{Sol,2} \quad (284)$$

ここで、 X_{CW} は熱的破損時の管壁が管壁として残る場合の割合を表す入力パラメータである。

内部ノードの破損により、ある破損口から径方向の運動が可能になるが、小さな穴からの流出を想定しているため、以下のようなオリフィス係数で圧力損失を与える。

$$\beta = \beta_{CW} + f_{CW}(1 - \beta_{CW}) \quad (285)$$

$$C_{ORF} = 1.35(1 - \beta)(1 - \beta^2) \frac{1}{\beta^2} \quad (286)$$

ただし、 β_{CW} は壁を横切る径方向流動を許容する管壁の面積割合であり、デフォルト値は 0.1 である。

管壁構造材の機械的安定性を考慮した構造材破損メカニズムを追加することは妥当であろう。管壁が溶融の結果かなり薄くなるとき、あるいは、その内部ノード温度がスチールの機械的強度を喪失する温度を超えるとき、構造材の健全性はもはや維持できないであろう。したがって、管壁の厚みが以下の条件を下回ったとき、壁破損を仮定する。

$$W_{CW} < W_{CW,min} \quad (287)$$

ただし、 $W_{CW,min}$ は管壁の最小厚みの閾値である。

また、構造材強度はそのバルク温度が融点に近接するにつれて急激に低下する。そのような高温下では、部分的に管壁破損が生じると考えられ、それにより形成された小さな穴を通して流体は径方向運動しようとするのが妥当であろう。その破損メカニズムを導入するため、管壁内部温度が次のような基準 T_{fail} を超えるときに壁破損が生じると仮定する。

$$T_{Sm} > T_{fail} \quad (288)$$

上記の追加で述べた場合は径方向運動のみを許容していることに留意しなければならない。つまり、管壁は熱的破損条件を満たすまでは管壁はそのまま構造材として維持され液体場への移行はない。

6.3.2 クラスト燃料の破損

燃料クラストはとても脆く割れやすいと考えられるから、クラスト下面の構造材が健全なときだけ構造材壁表面に存在できると仮定する。すなわち、管壁が消失、あるいは、その表面が溶融する場合には、燃料クラストは破損すると考えられる。よって、以下の 2 つの条件のうち 1 つでも条件を満たせば、クラスト燃料は破損すると仮定する。

まず、管壁が消失するとき、クラスト燃料は破損する。左側クラストに対するそのクライテリアは次式である。

$$\bar{\rho}_{s8} + \bar{\rho}_{s9} = 0 \quad (289)$$

次に、クラストで覆われている管壁表が溶融開始すると、クラストは不安定になる。しかしな

がら、その溶融開始する際にクラストが厚ければ健全のまま留まることも想定される。したがって、左側クラストに対するクラスト燃料破損は以下の条件によって判断される。

$$T_{s5} \geq T_{Sol,2} \quad (290)$$

$$W_{CF} < W_{CF,min} \quad (291)$$

ここで、 $W_{CF,min}$ は燃料クラストの最小厚みである。

左側クラスト燃料に対する質量およびエネルギーは固体燃料粒子に移行される。

$$\tilde{\rho}_{s3}^{n+1} = \tilde{\rho}_{s4}^{n+1} = 0 \quad (292)$$

$$\tilde{e}_{s2}^{n+1} = e_{s,1}^0 \quad (293)$$

$$\tilde{\rho}_{l5}^{n+1} = \bar{\rho}_{l5}^n + \bar{\rho}_{s3}^n \quad (294)$$

$$\tilde{\rho}_{l6}^{n+1} = \bar{\rho}_{l6}^n + \bar{\rho}_{s4}^n \quad (295)$$

$$\tilde{e}_{L4}^{n+1} = \frac{(\bar{\rho}_{l5}^n + \bar{\rho}_{l6}^n)e_{L4}^n + (\bar{\rho}_{s3}^n + \bar{\rho}_{s4}^n)e_{s2}^n}{\tilde{\rho}_{l5}^{n+1} + \tilde{\rho}_{l6}^{n+1}} \quad (296)$$

右側クラストに対しても全く同様に扱われる。

7 多ノード集合体管壁モデルの検証

まず、様々な構造材配位パターンに対してモデルの動作確認を実施し、熱伝導コードによる詳細解と一致することを確認した（付録 A 参照）。その上で、本章では、第 1 期検証研究³⁾において問題となった構造材内熱伝導問題を計算する。また、スチール固化・溶融に加えて、燃料クラスト形成問題を取りあげ、モデル検証を実施した。

7.1 簡易熱伝導問題

まず、ラップ管内熱伝導計算に対する改善効果を見るため、SIMMER-III の第 1 期検証研究³⁾における構造材内熱伝導問題を計算する。本問題は図 7 に示すように、1000K のクラストが 400K の管壁に瞬時に接触した際の温度応答を見るものである。

計算された壁内温度分布を図 8 に示す。従来の 2 ノードモデルと多ノードモデルは 6mm 地点の内部ノード温度は一致しているが、表面ノード温度は多ノード化することで大幅に低下した。これは多ノード化により、壁内熱伝導を適切に計算できるからである。図 9 および図 10 は計算されたクラスト温度履歴の短期および長期の挙動をそれぞれ示す。図中には、詳細メッシュで TAC2D コード⁹⁾により計算された詳細解を併せて示す。管壁内部のノード数を増加するにつれて、詳細解に一致することが分かる。これにより、正確に熱伝導問題を解けることを確認できた。

7.2 液体スチール固化問題

融点近傍の液体スチールが低温の管壁と接触すると、液体スチールは相変化によって管壁表面に固化される。固化されたスチールは構造材として扱われるため、構造材体積率が適切に増加するかを確認する。図 11 に示すように、初期条件として、液体スチール温度を $T_{m.p.}=1715\text{K}$ 、管壁温度を $T_{steel}=500\text{K}$ と設定した。これはノイマン問題¹⁰⁾として知られており、次式の理論解との比較も行う。

$$\delta_{steel} = 2\lambda_{steel}\sqrt{\alpha_{steel}t} \quad \text{where} \quad \alpha_{steel} = k_{steel}/(\rho_{steel}Cp_{steel}) \quad (297)$$

ここで、熱拡散率 $\alpha_{steel} = 20/(7344 \times 532) = 5.12\text{mm}^2/\text{s}$ 、 λ_{steel} は成長定数と呼ばれ、ここでは $0.8^{11)}$ を用いた。

図 12 に解析結果を示す。SIMMER-III 解析においては Solidus 温度と Liquidus 温度を 1713K に設定した。管壁が薄い場合は、2 ノードモデルと多ノードモデルは本質的に同じであるため、結果は同じであるが、管壁厚みが成長するにつれて、多ノードモデルは理論解との差は最大 8% であるので、よく一致すると判断できる。なお、この差は理論モデルでは液体スチール温度一定に対し、SIMMER-III では液体スチールの温度低下を考慮しているからである。これにより、管壁成長挙動もよく捉えられることが確認できた。

7.3 スチール壁溶融問題

高温の液体スチールが融点近傍の管壁に接触すると、管壁表面は溶融して厚みは減少する。構造材厚みの減少により、管壁内部のノード数も減少していく。図 13 にスチール溶融問題の解析体系を示す。初期条件として、液体スチール温度 $T_{steel}=3000\text{K}$ 、管壁温度を $T_{m.p.}=1713\text{K}$ と設定した。ここでも、前節の理論解との比較が可能であるが、成長定数はセンシティブであり、溶融する本ケースにおいては 0.6 を用いた。

図 14 に解析結果を示す。SIMMER-III は理論解との差が最大 13% であり、よく再現できている

と判断でき、モデルの妥当性を確認できた。なお、この差は SIMMER-III の液体スチール温度は熱損失により温度低下するため、長期においては管壁溶融速度が低下するからである。2 ノードモデルと多ノードモデルが一致するのは管壁温度が融点であり、壁内温度分布がないからである。

7.4 燃料クラスト形成問題

融点近傍の液体燃料が低温の管壁に接触すると、液体燃料は非平衡固化により管壁表面にクラストとして付着する。燃料クラスト形成はそれ自身が熱抵抗になるため、ラップ管破損タイミングに極めて重要な役割を果たす。検証問題として、図 15 に示すような簡易体系での解析を実施した。初期条件は、液体燃料温度を $T_{fuel}=3150K$ 、管壁温度を $T_{steel}=500K$ と設定した。同様に、次式¹¹⁾で比較を行う。

$$\delta_{fuel} = 2\lambda_{fuel} \sqrt{\alpha_{fuel} t} \quad \text{where} \quad \alpha_{fuel} = k_{fuel} / (\rho_{fuel} C p_{fuel}) \quad (298)$$

ここで、熱拡散率 $\alpha_{fuel} = 3.4 / (9977 \times 600) = 0.568 mm^2 / s$ である。

図 16 に解析結果としてクラスト厚みを比較する。多ノードモデルは初期には理論解との差が最大 12%であり、よく一致していると判断できる。時間が経つにつれて多ノードモデルではクラストが厚くなるのは液体燃料温度が少し低下して燃料側熱流束が低下したためである。壁内温度を図 17 に示す。従来の 2 ノードモデルは表面ノードがすぐに融点に到達しているのに対して、多ノードモデルは壁内温度分布を適切に模擬できているため表面ノードは融点にまで達していない。図 18 に溶融スチール体積率を示すが、多ノードモデルはスチール溶融が見られないのに対して、2 ノードモデルでは有意に溶融していることが分かる。実機において、溶融したスチールは燃料と混合することにより有意に燃料温度を低下させるため、これを適切に捉えることができる多ノードモデルの有意性が示された。このように、クラスト形成に対しても、開発された多ノードモデルの妥当性を確認できた。

8 結論

SIMMER-III/IV コードの要素物理モデルである構造材場モデルの集合体管壁モデルを従来の 2 ノードから多ノードに拡張した。本報告書では、モデル拡張部分のみならず、従来の 2 ノードモデルも併せて詳細に記述した。開発された多ノード集合体管壁モデルは、様々な構造材配位パターンおよび溶融固化問題に対して基礎モデル検証を行い、その妥当性を確認した。

多ノードモデルによって、集合体管壁内温度分布だけでなく、管壁表面ノード温度を的確に評価できるようになったため、クラスト不安定モデルの検討に有効に活用ができ、壁破損予測精度を向上させることが可能である。これは、現在リファレンス概念である改良型 FAIDUS 集合体で重要となっている破損タイミングを適切に評価するのに有効である。壁破損を正確に評価するには、熱機械的破損モデルの導入も将来的には検討する必要があると考えられるが、その開発には壁内温度分布を与える必要があり、本研究はその開発の足がかりを提供できた。

参考文献

- 1) Y. Tobita, Sa. Kondo, H. Yamano, K. Morita, W. Maschek, P. Coste and T. Cadiou, “The Development of SIMMER-III, An Advanced Computer Program for LMFR Safety Analysis and Its Application to Sodium Experiments,” Nuclear Technology, Vol. 153, No. 3, pp. 245-255 (March 2006).
- 2) H. Yamano, S. Fujita, Y. Tobita, K. Kamiyama, Sa. Kondo, K. Morita, E. A. Fischer, D. J. Brear, N. Shirakawa, X. Cao, M. Sugaya, M. Mizuno, S. Hosono, T. Kondo, W. Maschek, E. Kiefhaber, G. Buckel, A. Rineiski, M. Flad, T. Suzuki, P. Coste, S. Pigny, J. Louvet and T. Cadiou “SIMMER-III: A Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis, Version 3.A Model Summary and Program Description,” JNC TN9400 2003-071 (August 2003).
- 3) Sa. Kondo, D. J. Brear, Y. Tobita, K. Morita, W. Maschek, P. Coste and D. Wilhelm, “Status and Achievement of Assessment Program for SIMMER-III, a Multiphase, Multicomponent Code for LMFR Safety Analysis,” 8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermo-Hydraulics (NURETH-8), Kyoto, Japan Vol.3 pp.1340-1348 (Sep. 30 – Oct. 4, 1997).
- 4) Sa. Kondo, H. Yamano, Y. Tobita, S. Fujita, K. Kamiyama, W. Maschek, P. Coste, S. Pigny and J. Louvet, “Phase 2 Code Assessment of SIMMER-III, A Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis,” JNC TN9400 2000-105 (September 2000).
- 5) H. Yamano, S. Fujita, Y. Tobita, Sa. Kondo, K. Morita, M. Sugaya, M. Mizuno, S. Hosono and T. Kondo, “SIMMER-IV: A Three-Dimensional Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis, Version 2.A Model Summary and Program Description,” JNC TN9400 2003-070 (August 2003).
- 6) K. Kamiyama and Sa. Kondo, “SIMMER-III Structure Model –Model and Method Description–,” JNC TN9400 2004-043 (July 2004).
- 7) Y. Tobita, H. Yamano and I. Sato, “Analytical Study on Elimination of Severe Recriticalities in Large Scale LMFBRs with Enhancement of Fuel Discharge,” Proc. Technical Meeting on Severe Accident and Accident Management for Nuclear Power Plants, Tokyo, Japan (March 14-16, 2006).
- 8) K. Morita, H. Yamano, Y. Tobita and Sa. Kondo, “SIMMER-III/IV Heat- and Mass-Transfer Model –Model and Method Description–,” JNC TN9400 2003-047 (July 2003).
- 9) J. F. Petersen, “TAC2D, A General Purpose Two-Dimensional Heat Transfer Computer Code – User’s Manual,” USAEC Report GA-8868, Gulf General Atomic (September 1969).
- 10) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, “Conduction of Heat in Solids,” Oxford University Press (1959).
- 11) M. Epstein, M.A. Grolmes, R.E. Henry and H.K. Fauske, “Transient Freezing of a Flowing Ceramic Fuel in a Steel Channel,” Nuclear Science and Engineering, Vol. 61, pp.310-323 (1976).

記号表

a	:	Interface area per unit volume [1/m]
c	:	Heat capacity [J/kg/K]
D_h	:	Hydraulic diameter [m]
e	:	Specific internal energy [J/kg]
$e_{sol,M}$	:	Solidus energy for material M [J/kg]
$e_{liq,M}$	:	Liquidus energy for material M [J/kg]
$h_{f,M}$	:	Latent heat of fusion for material M [J/kg]
h	:	Heat transfer coefficient [W/m ² /K]
m	:	Mass [kg]
P_m	:	Power amplitude
r_{C0}	:	Radius of left cell boundary in the cylindrical geometry [m]
r_{C1}	:	Radius of right cell boundary in the cylindrical geometry [m]
r_m	:	Radius of the boundary for can wall and crust components [m], (m=1 - 6)
r_{tm}	:	Radius of temperature point for can wall and crust components [m], (m=1 - 6)
T	:	Temperature [K]
V	:	Cell volume [m ³]
v	:	Specific volume [m ³ /kg]

Greek letters

α	:	Volume fraction
δ	:	Thermal penetration length [m]
Δt	:	Time step [s]
ΔR	:	Mesh cell width [m]
κ	:	Thermal Conductivity [W/m/K]
Γ_m	:	Mass-transfer per unit volume to the component m [kg/s/m ³]
$\bar{\rho}$	:	Macroscopic density [kg/m ³]
ρ	:	Density [kg/m ³]
$\tau_{str,M}$	:	Structure time constant [s]

Subscripts

f	:	Fuel
FG	:	Fission gas
gas	:	Gas
g_m	:	Density components of gas (m=1-5)
G_m	:	Material components of gas (m=1-4)
LCW	:	Left can wall
lm	:	Density components of liquid (m=1-13)
Lm	:	Energy components of liquid (m=1-7)
M	:	Material component
		$M_1 = 1$: Fuel
		$M_1 = 2$: Steel

nf	:	Non-flow volume
pin	:	Fuel pin
RCW	:	Right can wall
s	:	Steel
sm	:	Density components of structure (m=1-12)
Sm	:	Energy components of structure (m=1-9)
W	:	Thickness of can wall

Superscripts

0	:	zero (minimum) value
EQ	:	Equilibrium mass transfer
i	:	Input variable
n	:	Initial value of time step n
$\sim n + 1$	:	Updated value in time step n

表 1 : SIMMER-III 流体力学部構造材場成分

Density Components (MCSR)		Energy Components (MCSRE)	
s1	Fertile Pin Fuel Surface Node	S1	Pin Fuel Surface Node
s2	Fissile Pin Fuel Surface Node		
s3	Left Fertile Fuel Crust	S2	Left Fuel Crust
s4	Left Fissile Fuel Crust		
s5	Right Fertile Fuel Crust	S3	Right Fuel Crust
s6	Right Fissile Fuel Crust		
s7	Cladding	S4	Cladding
s8	Left Can Wall Surface Node	S5	Left Can Wall Surface Node
s9	Left Can Wall Interior Node	S6	Left Can Wall Interior Node
s10	Right Can Wall Surface Node	S7	Right Can Wall Surface Node
s11	Right Can Wall Interior Node	S8	Right Can Wall Interior Node
s12	Pin Control Surface Node	S9	Pin Control Surface Node

表 2 : SIMMER-IV 流体力学部構造材場成分

Density Components (MCSR)		Energy Components (MCSRE)	
s1	Fertile Pin Fuel Surface Node	S1	Pin Fuel Surface Node
s2	Fissile Pin Fuel Surface Node		
s3	Left Fertile Fuel Crust	S2	Left Fuel Crust
s4	Left Fissile Fuel Crust		
s5	Right Fertile Fuel Crust	S3	Right Fuel Crust
s6	Right Fissile Fuel Crust		
s7	Front Fertile Fuel Crust	S4	Front Fuel Crust
s8	Front Fissile Fuel Crust		
s9	Back Fertile Fuel Crust	S5	Back Fuel Crust
s10	Back Fissile Fuel Crust		
s11	Cladding	S6	Cladding
s12	Left Can Wall Surface Node	S7	Left Can Wall Surface Node
s13	Left Can Wall Interior Node	S8	Left Can Wall Interior Node
s14	Right Can Wall Surface Node	S9	Right Can Wall Surface Node
s15	Right Can Wall Interior Node	S10	Right Can Wall Interior Node
s16	Front Can Wall Surface Node	S11	Front Can Wall Surface Node
s17	Front Can Wall Interior Node	S12	Front Can Wall Interior Node
s18	Back Can Wall Surface Node	S13	Back Can Wall Surface Node
s19	Back Can Wall Interior Node	S14	Back Can Wall Interior Node
s20	Pin Control Surface Node	S15	Pin Control Surface Node

表 3 : SIMMER-III/IV 流体力学部液体場成分

Density Components (MCLR)		Energy Components (MCLRE)	
<i>l1</i>	Liquid Fertile Fuel	<i>L1</i>	Liquid Fuel
<i>l2</i>	Liquid Fissile Fuel		
<i>l3</i>	Liquid Steel	<i>L2</i>	Liquid Steel
<i>l4</i>	Liquid Sodium	<i>L3</i>	Liquid Sodium
<i>l5</i>	Fertile Fuel Particles	<i>L4</i>	Fuel Particles
<i>l6</i>	Fissile Fuel Particles		
<i>l7</i>	Steel Particles	<i>L5</i>	Steel Particles
<i>l8</i>	Control Particles	<i>L6</i>	Control Particles
<i>l9</i>	Fertile Fuel Chunks	<i>L7</i>	Fuel Chunks
<i>l10</i>	Fissile Fuel Chunks		
<i>l11</i>	Fission Gas in Liquid Fuel		
<i>l12</i>	Fission Gas in Fuel Particles		
<i>l13</i>	Fission Gas in Fuel Chunks		

表 4 : SIMMER-III/IV 流体力学部蒸気場成分

Density Components (MCGR)		Material Components (MCGM1)	
<i>g1</i>	Fertile Fuel vapor	<i>G1</i>	Fuel Vapor
<i>g2</i>	Fissile Fuel vapor		
<i>g3</i>	Steel Vapor	<i>G2</i>	Steel Vapor
<i>g4</i>	Sodium Vapor	<i>G3</i>	Sodium Vapor
<i>g5</i>	Fission gas	<i>G4</i>	Fission gas

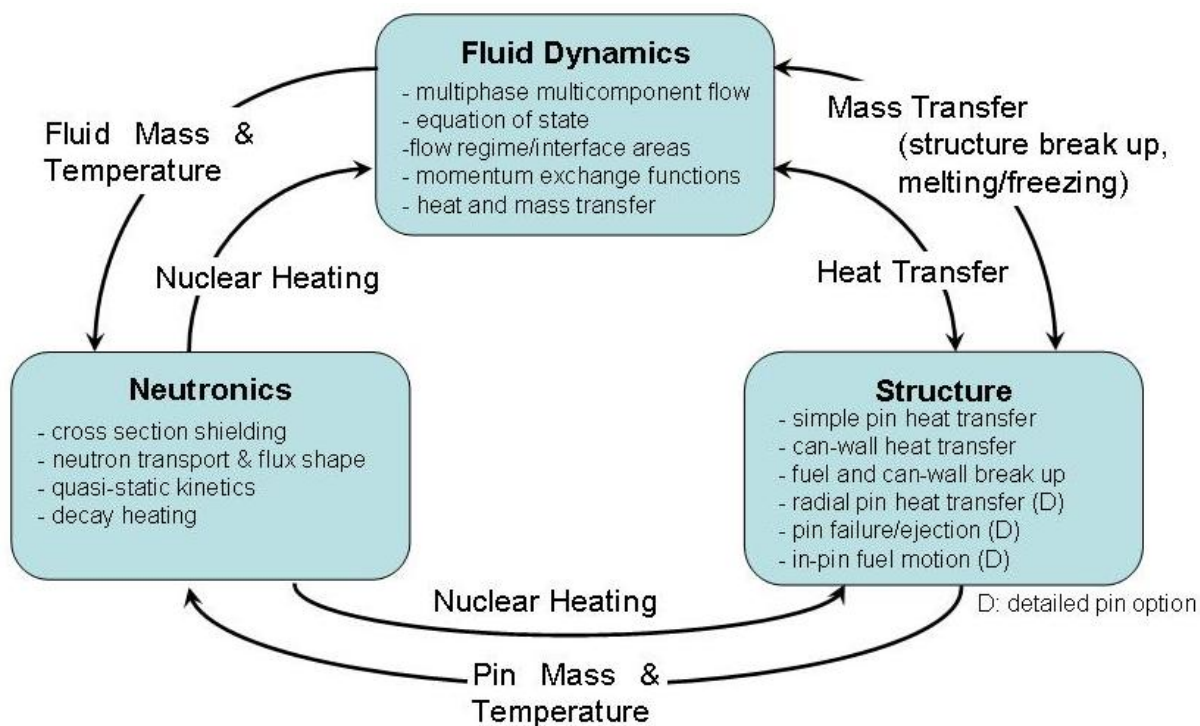


図 1 : SIMMER-III/IV コードの全体構造

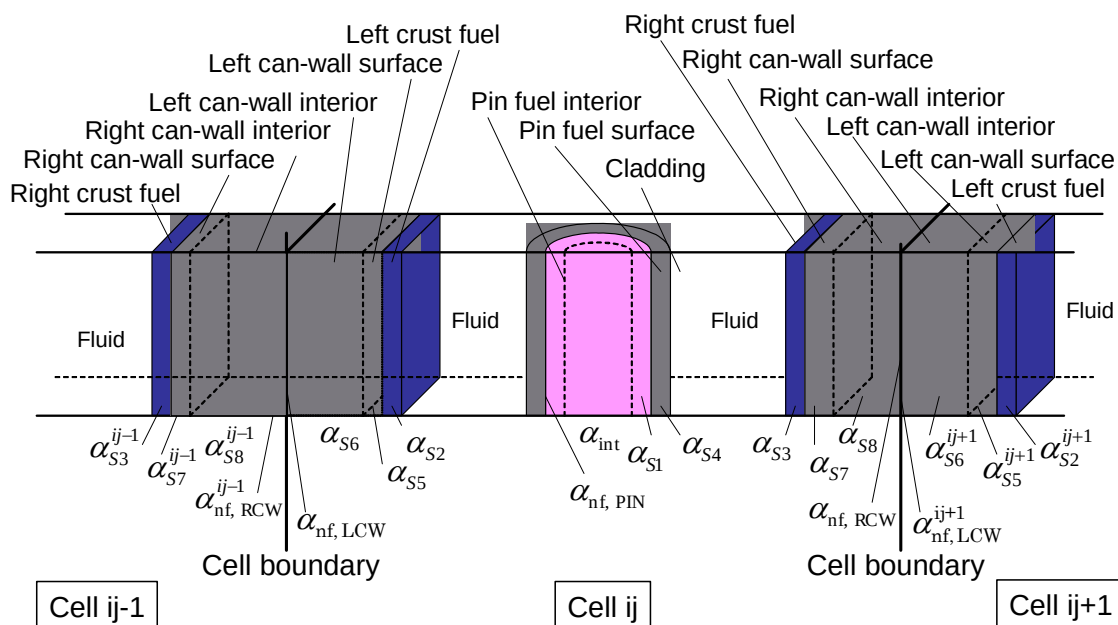


図 2 : 計算メッシュセル内の燃料ピンおよび集合体管壁配位

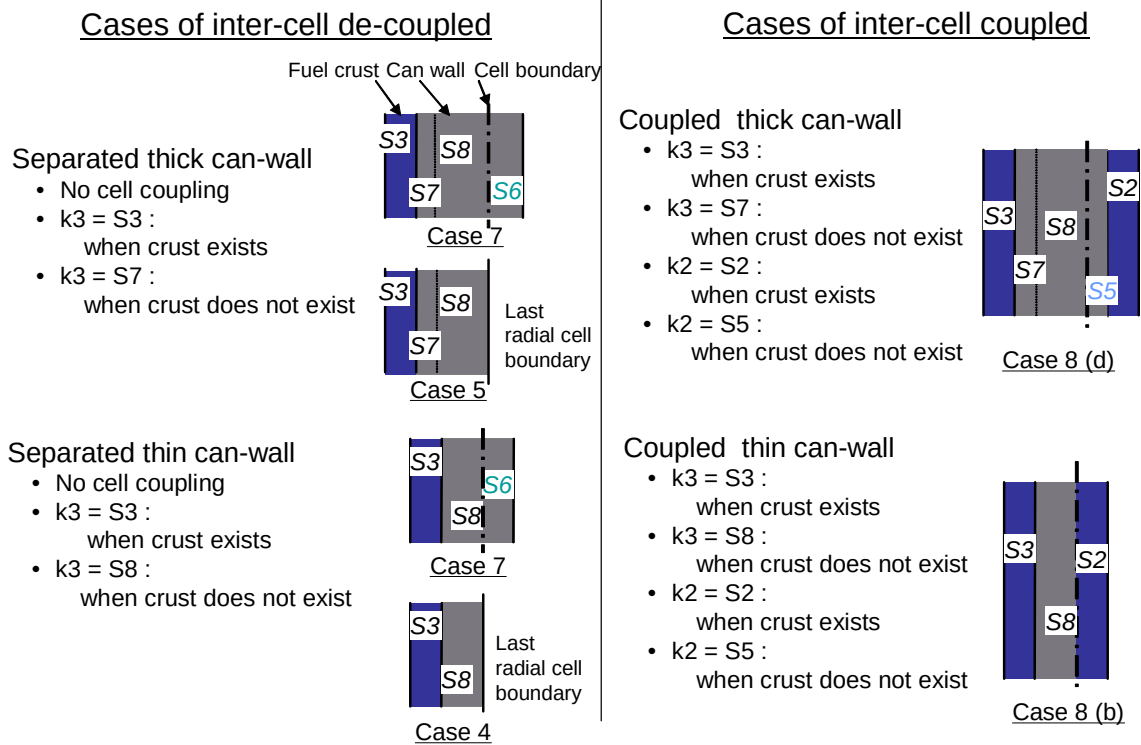


図 3 : 集合体管壁の配位 (右側セル境界に対する例)

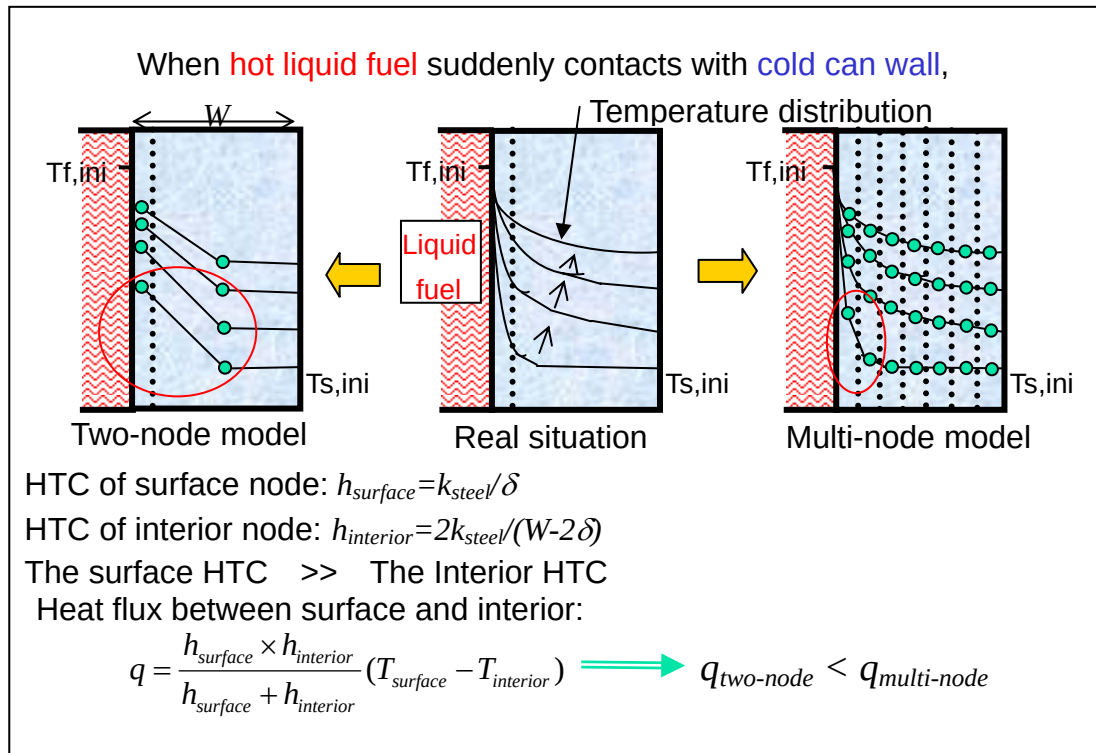


図 4 : 厚い集合体管壁に対する従来の 2 ノードモデルの欠点

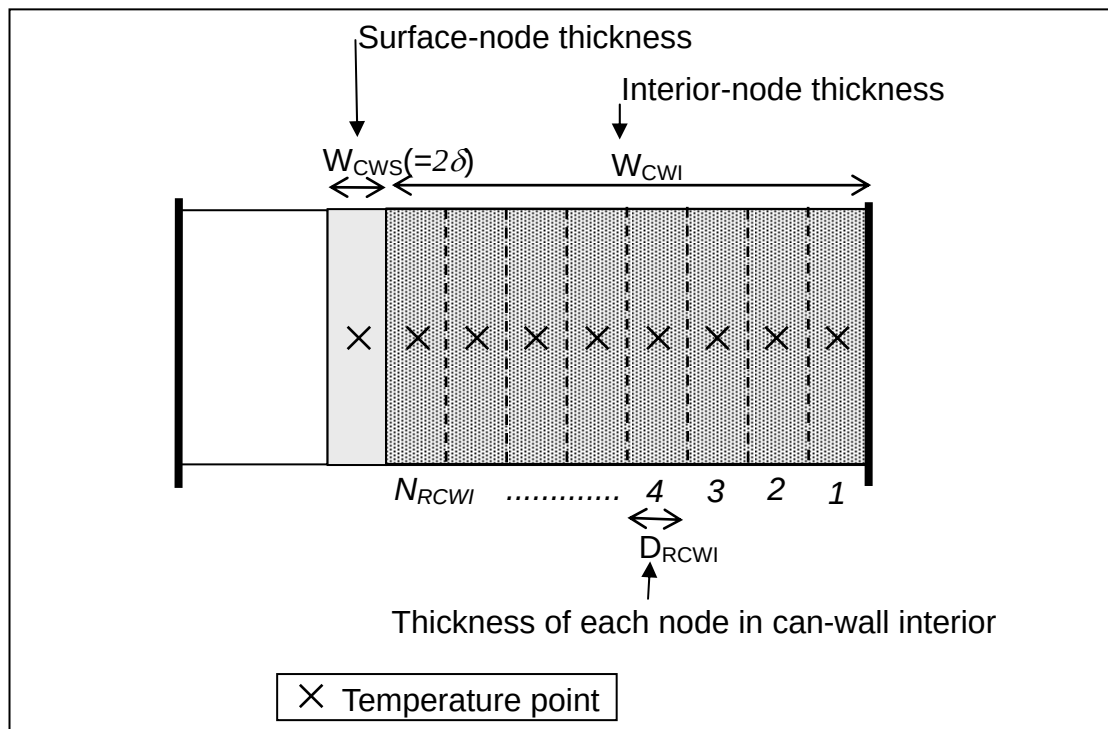


図 5 : マルチノードモデルの概念

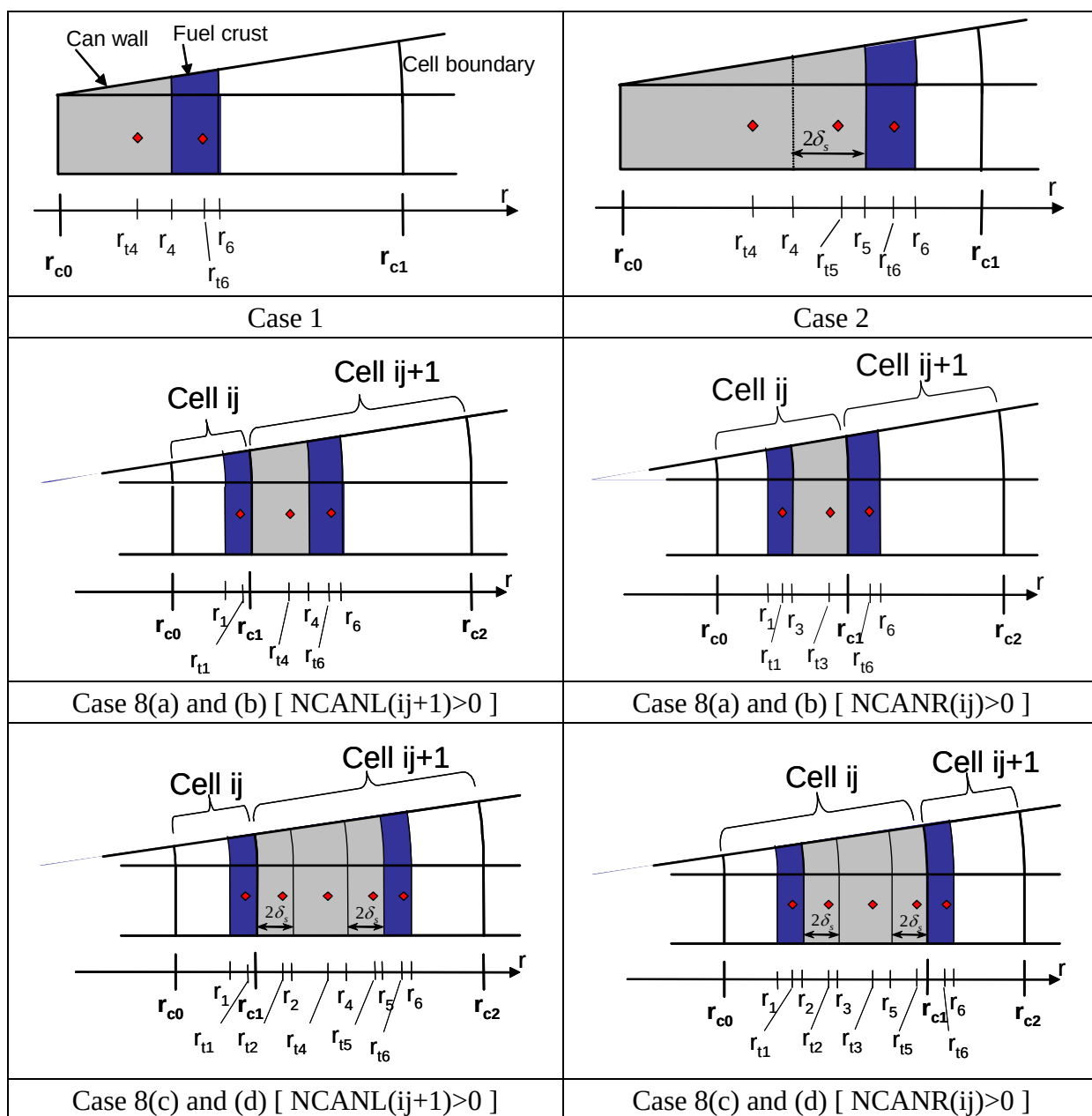


図 6 : 円筒体系における管壁のノード境界および温度点の各半径

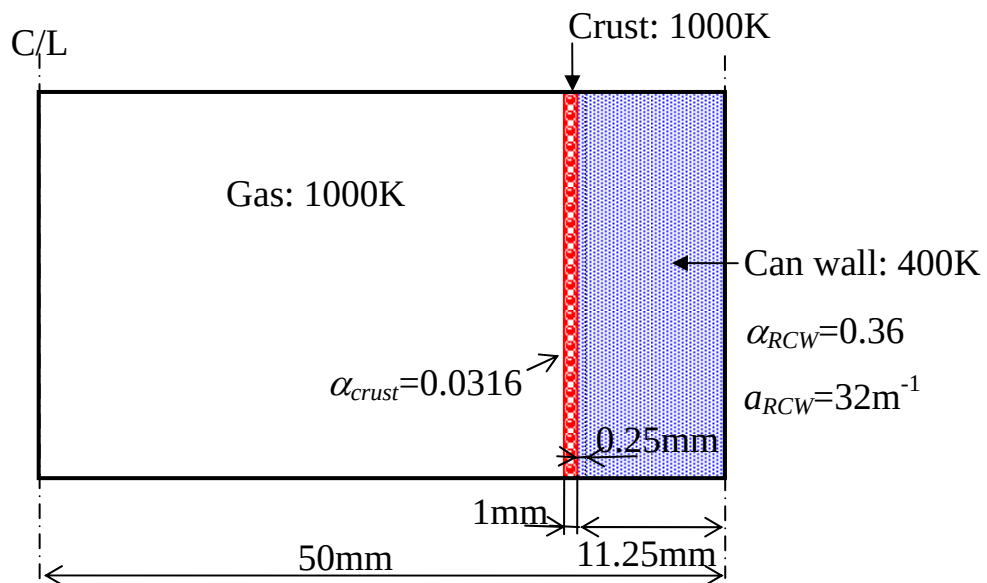


図 7：簡易熱伝導問題のための解析体系

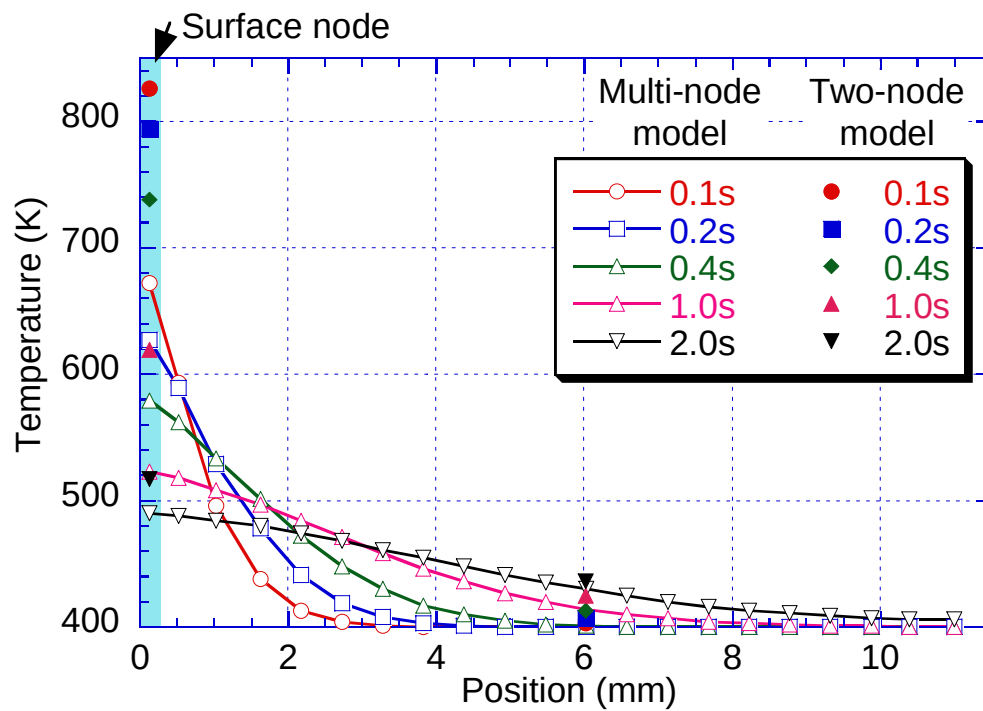


図 8：計算された壁内温度分布

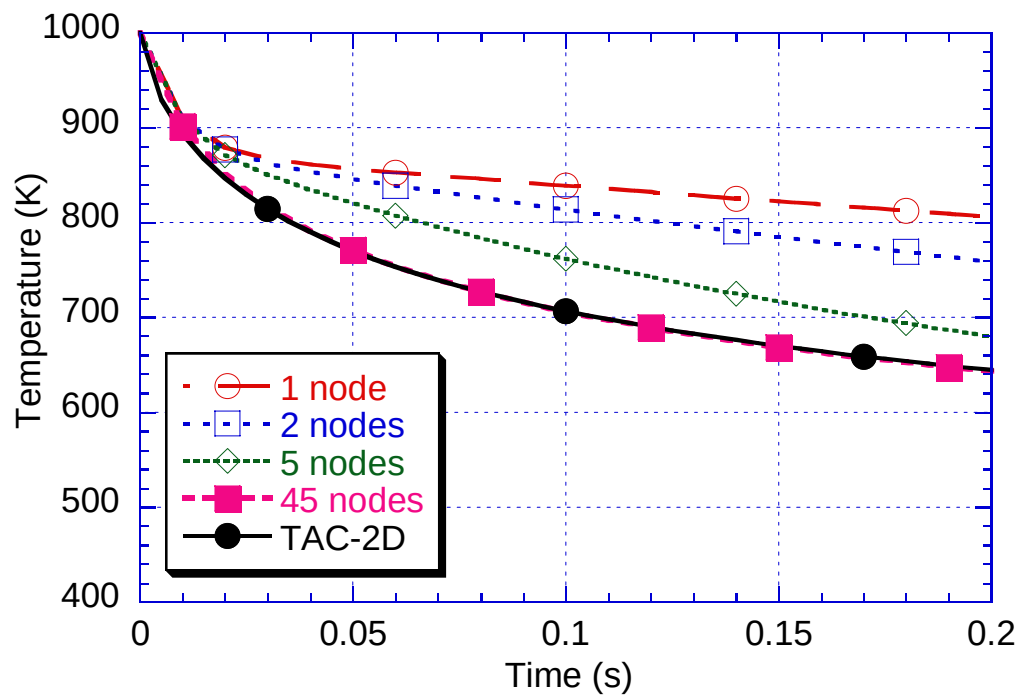


図 9 : 計算されたクラスト温度の短期挙動

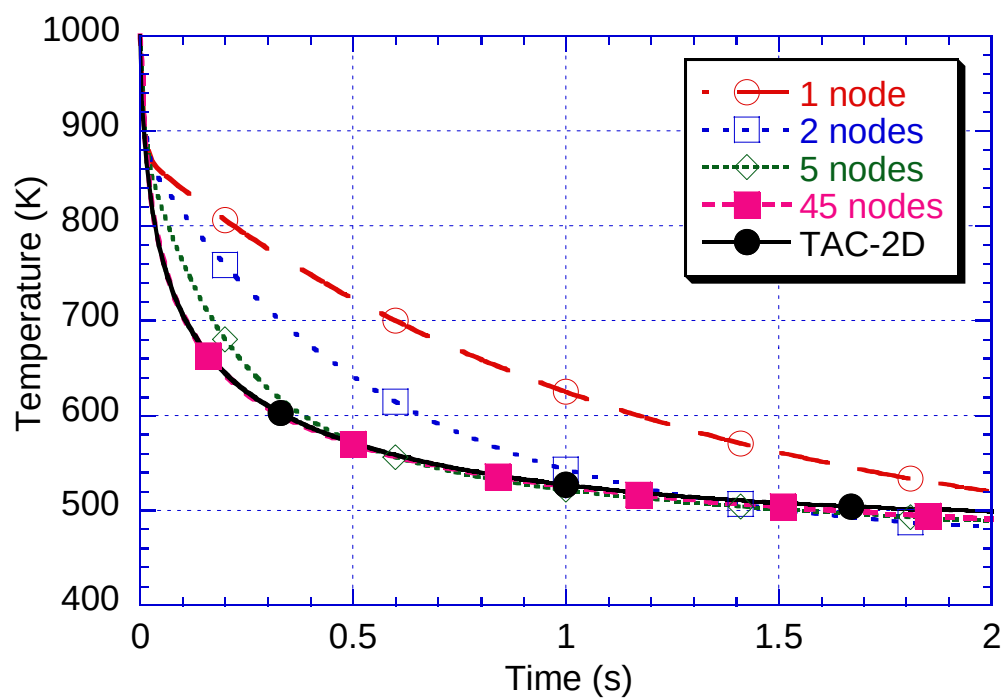


図 10 : 計算されたクラスト温度の長期挙動

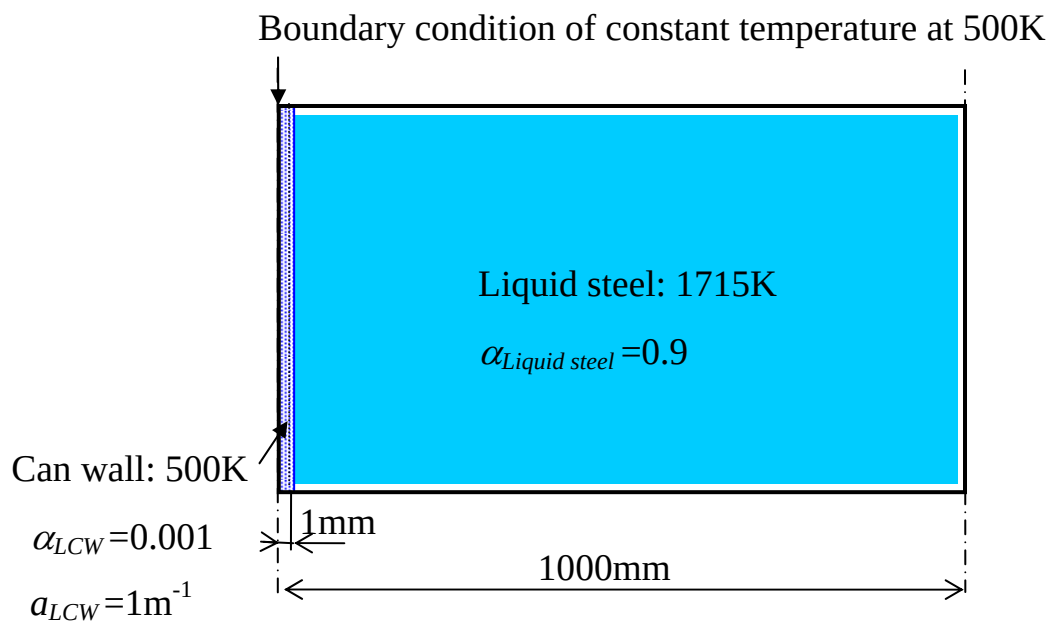


図 11 : スティール固化問題の解析体系

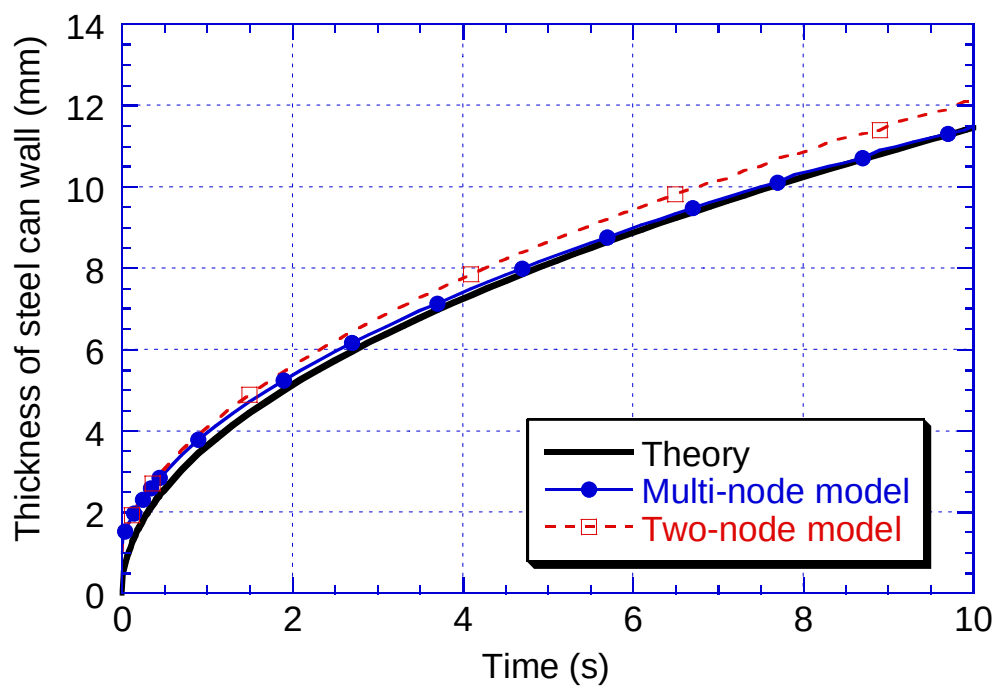


図 12 : スティール固化問題の解析結果

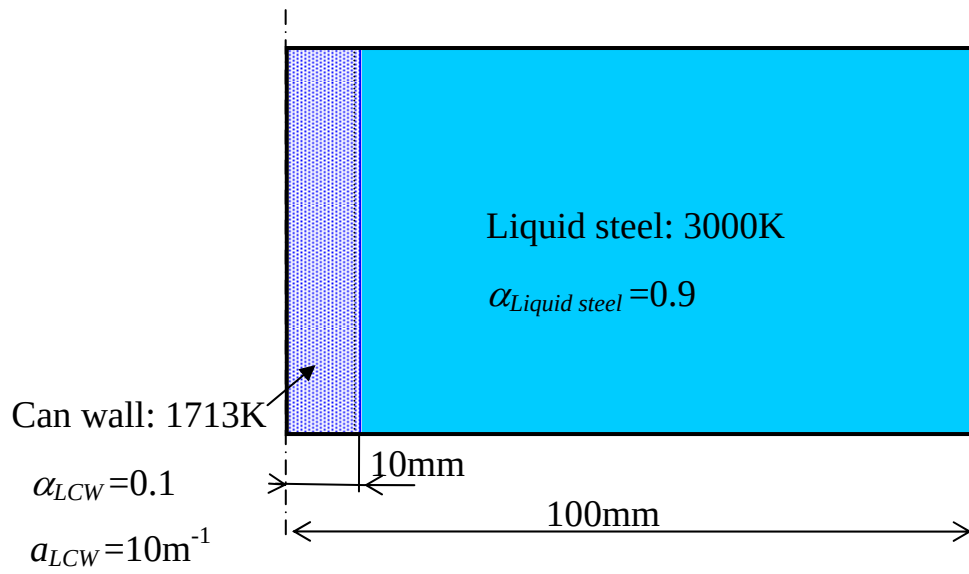


図 13 : スティール壁溶融問題の解析体系

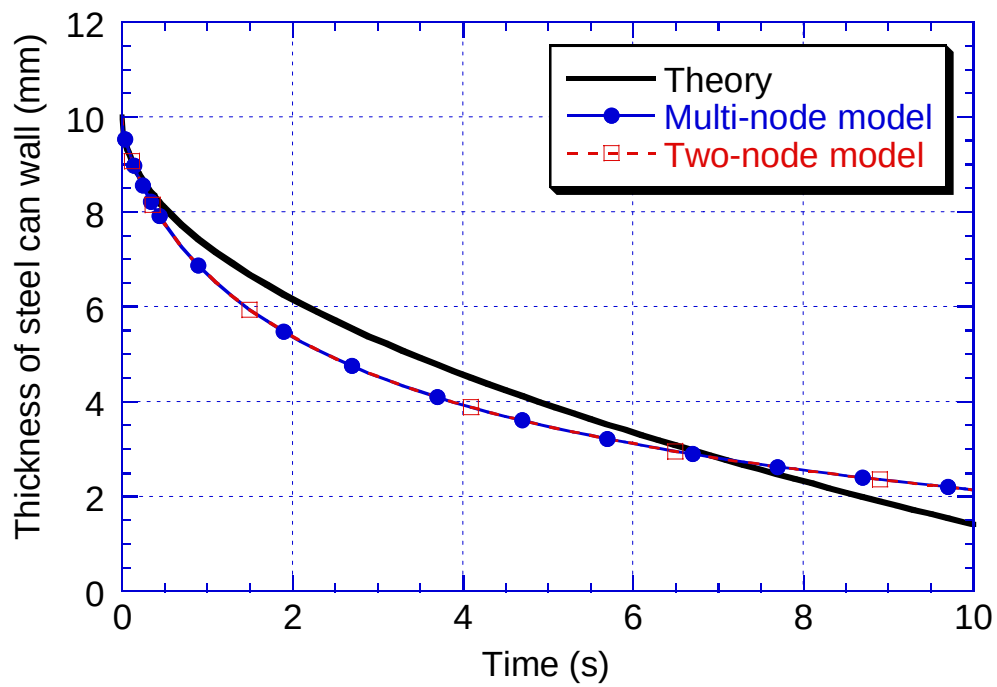


図 14 : スティール壁溶融問題の解析結果

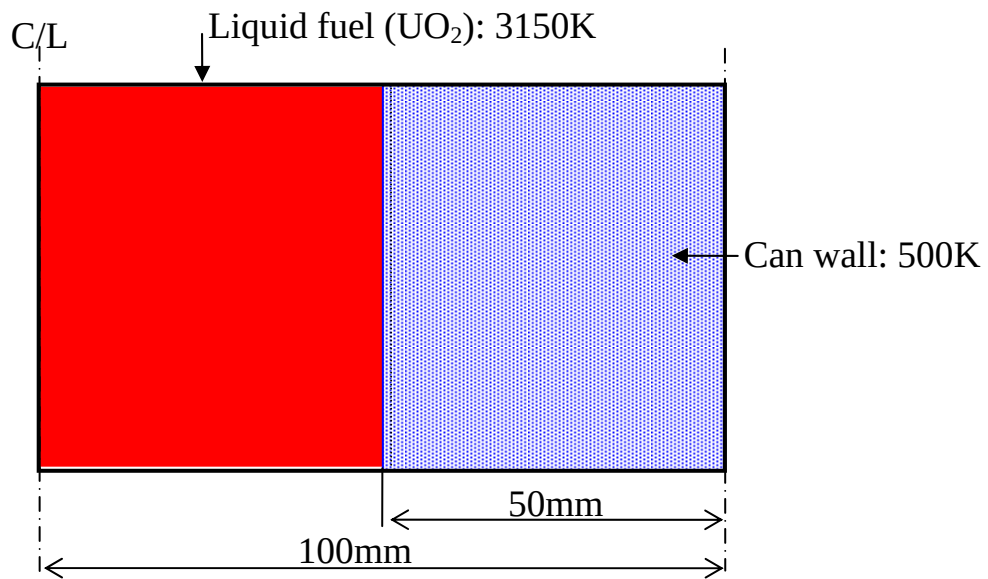


図 15 : 燃料クラスト形成問題の解析体系

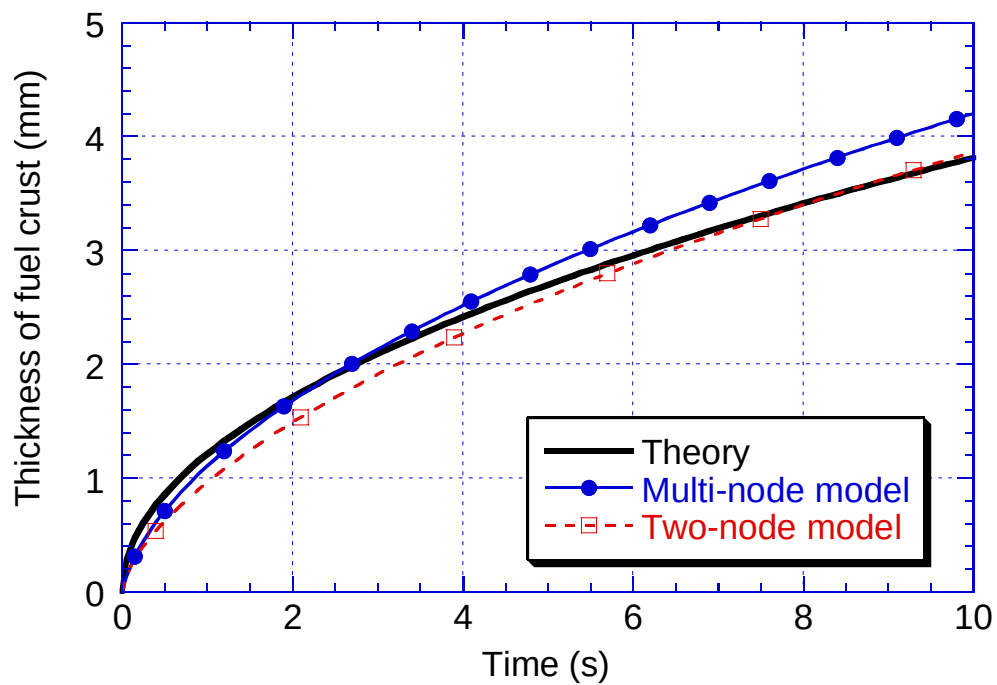


図 16 : 燃料クラスト形成問題のために計算されたクラスト厚み

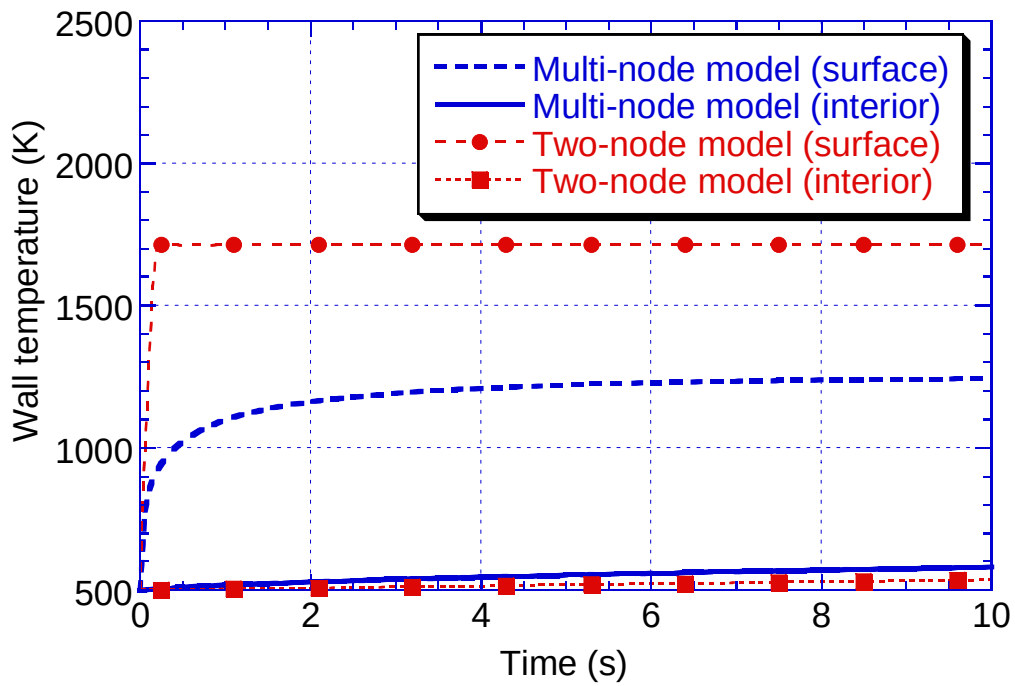


図 17：燃料クラスト形成問題のために計算された壁内温度

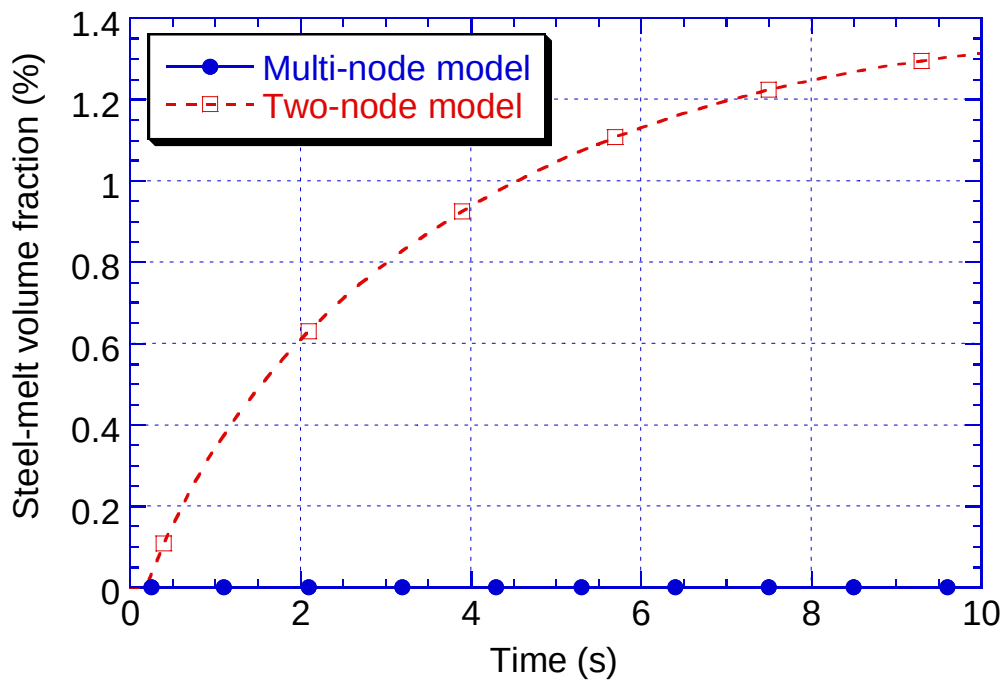
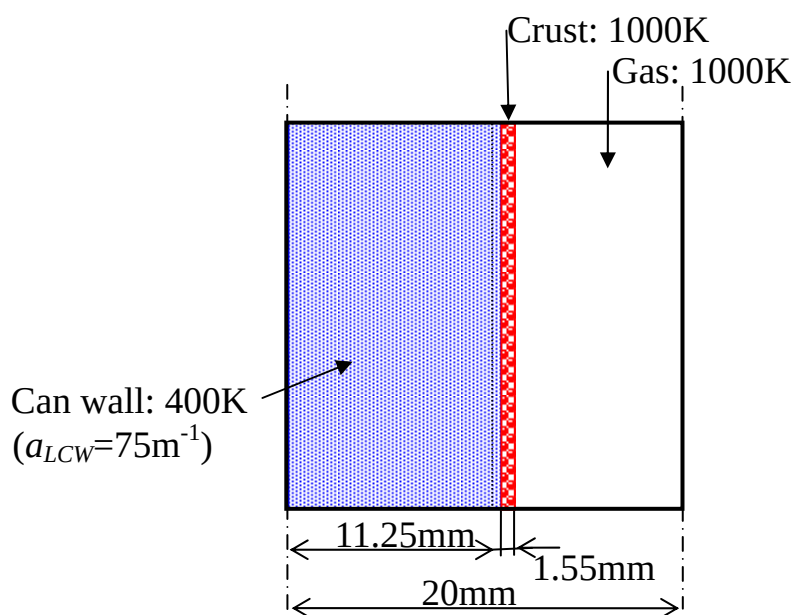
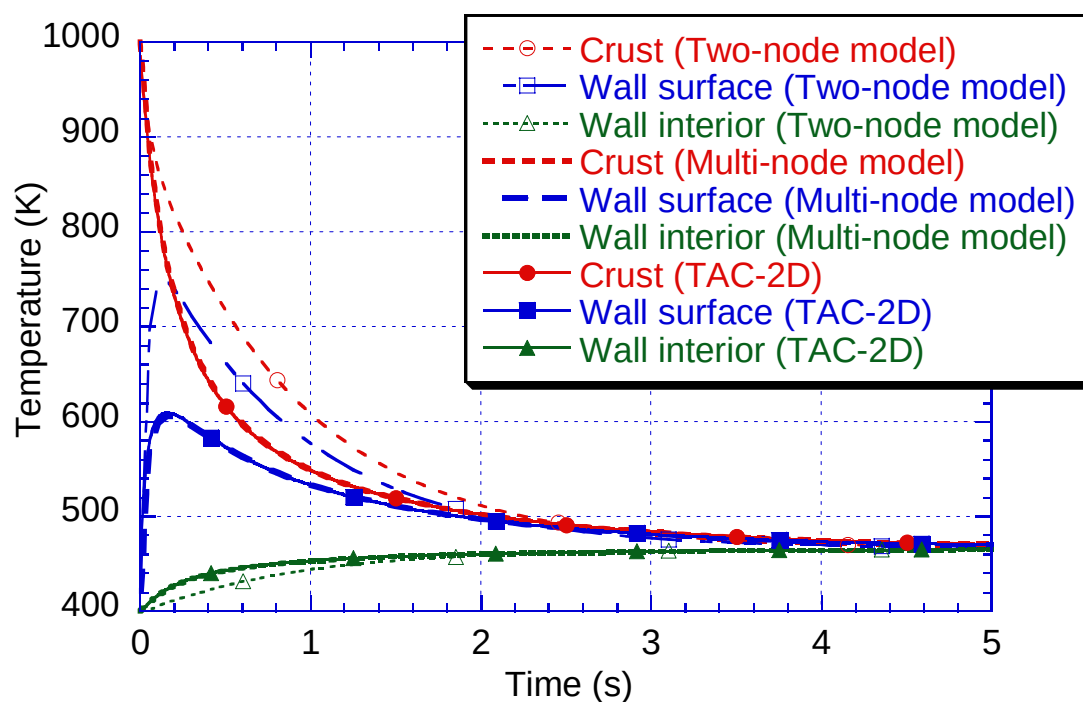


図 18：燃料クラスト形成問題のために計算された熔融スチール体積率

付録 A 様々な構造材配位パターンに対する基礎的検証

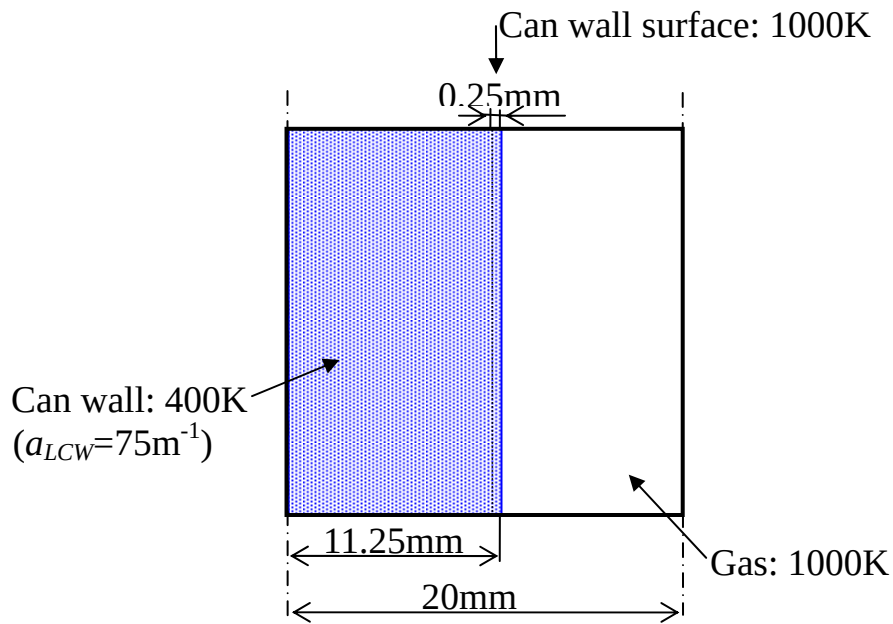


(a) Analytical geometry.

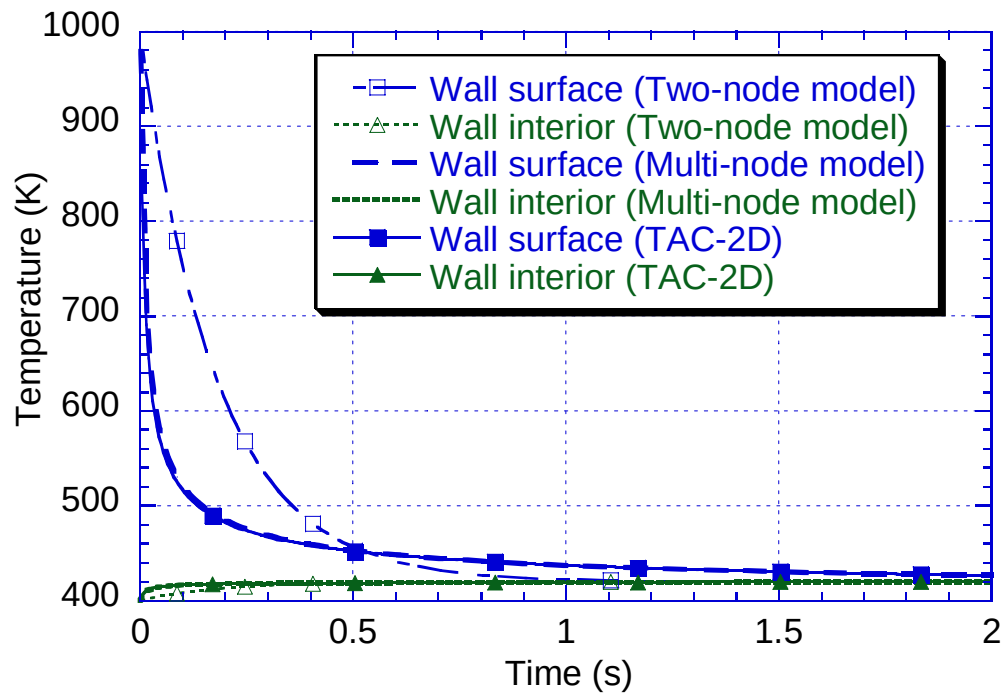


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-1: Crust surrounding thick left can wall coupling with thick right can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC1).

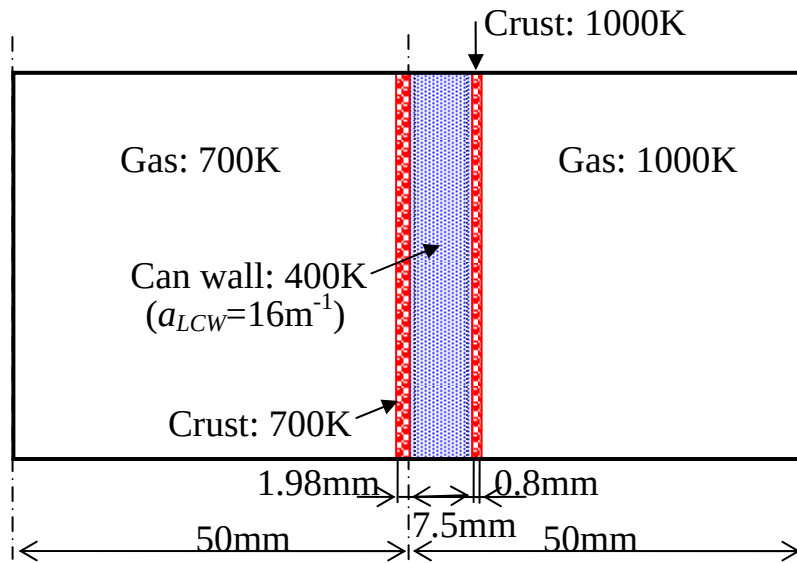


(a) Analytical geometry.

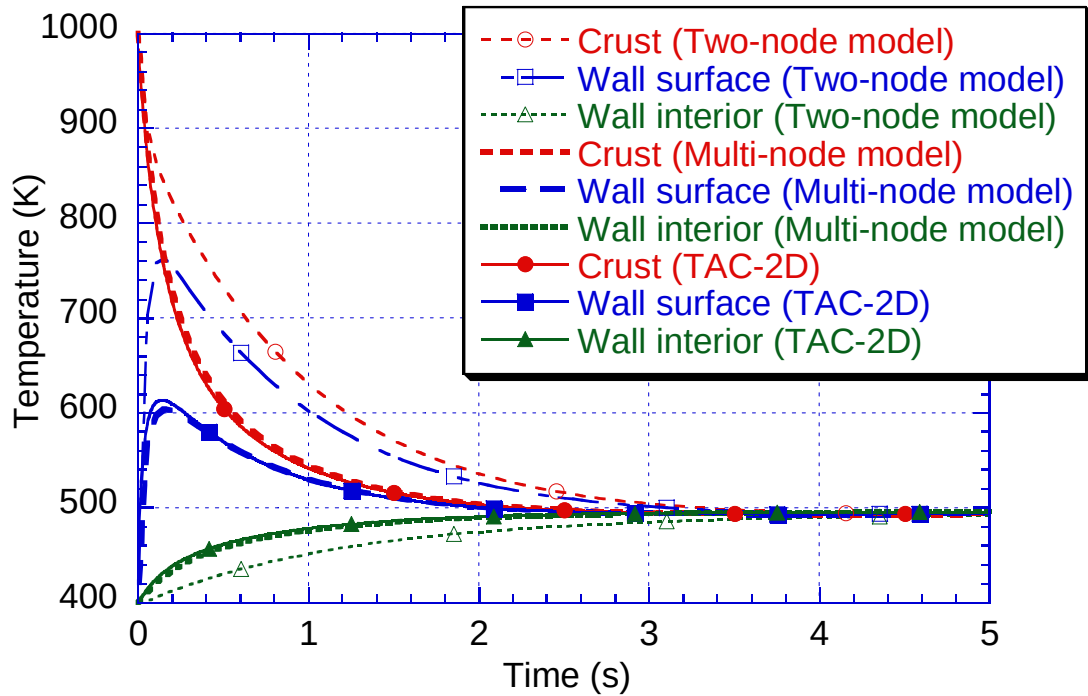


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-2: Thick left can wall coupling with adjacent thick right can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC2).

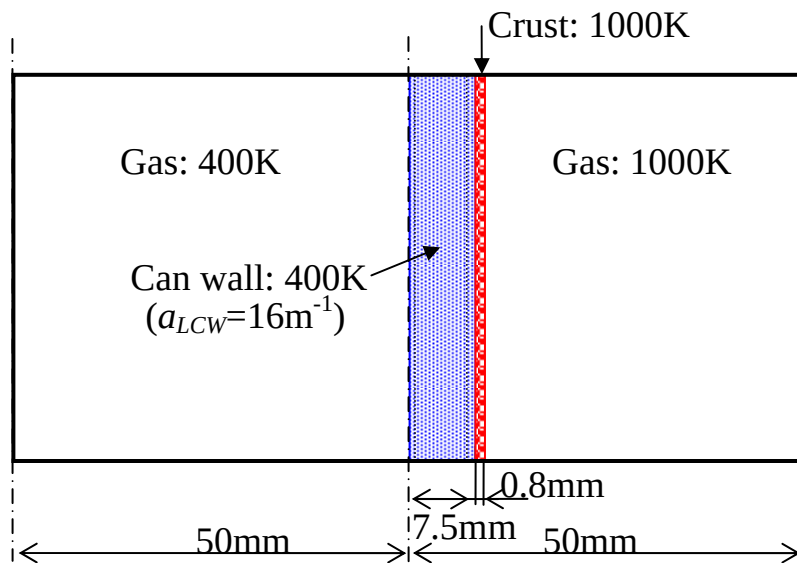


(a) Analytical geometry.

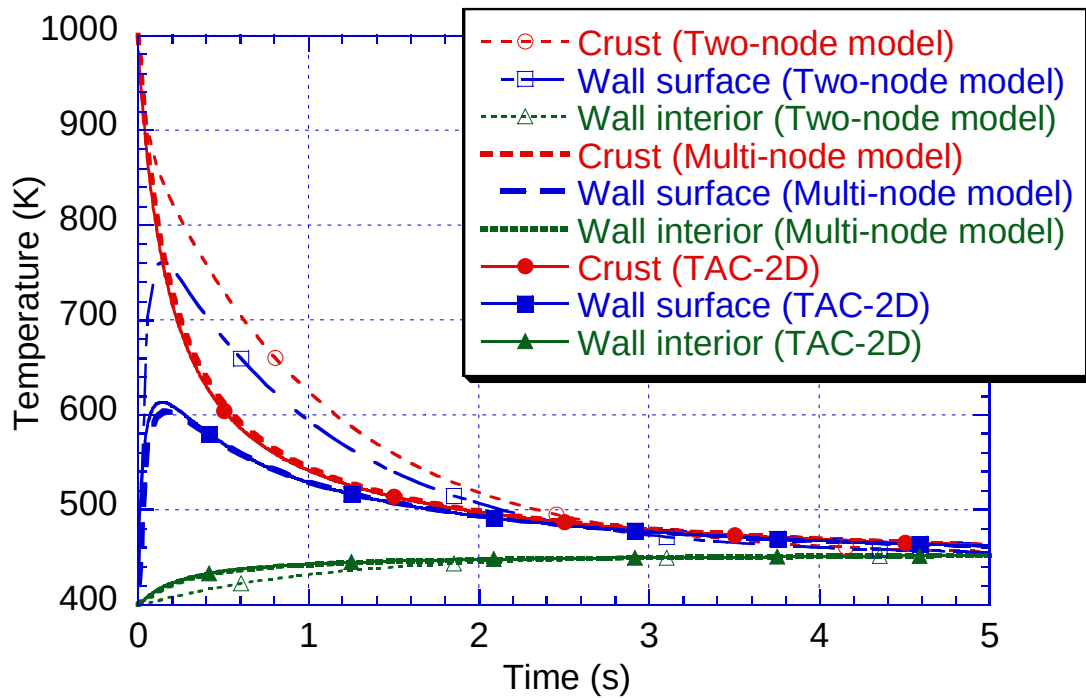


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-3: Crust surrounding thick left can wall coupling with right crust in the adjacent cell using slab geometry (NC4).

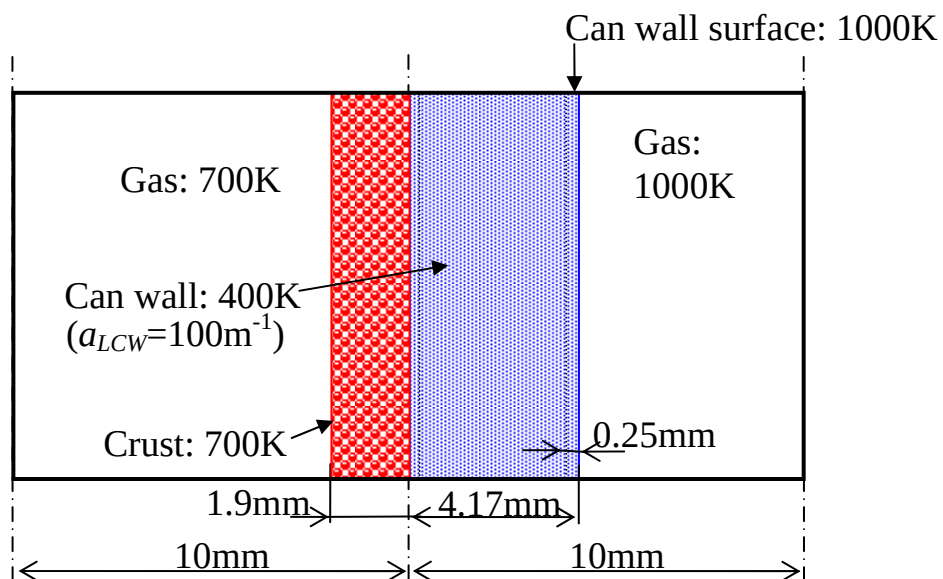


(a) Analytical geometry.

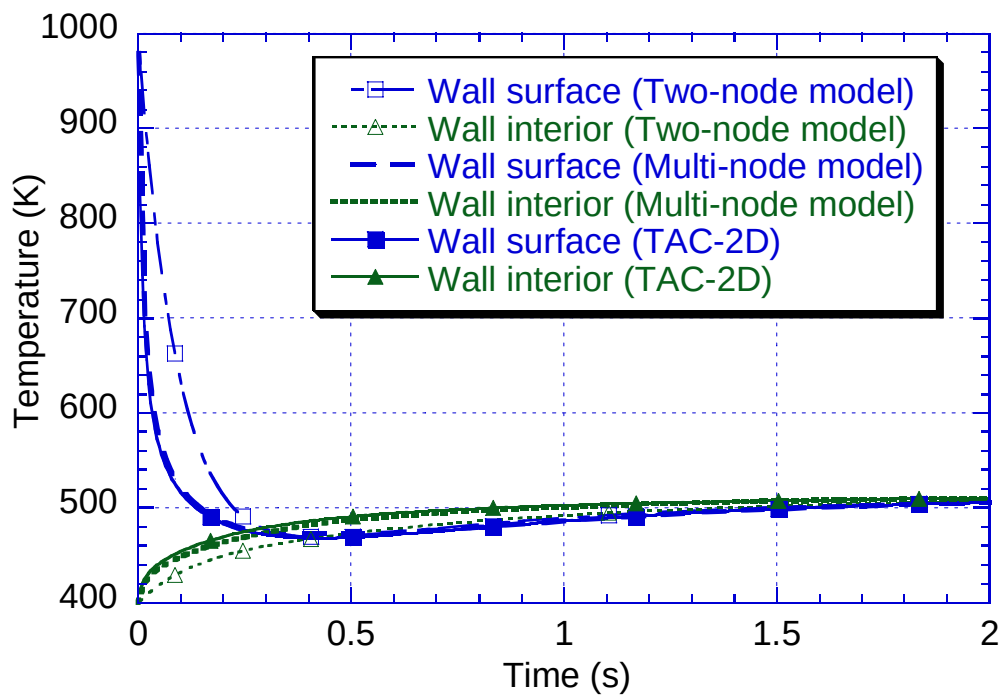


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-4: Crust surrounding thick left can wall coupling with no thick right can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC5).

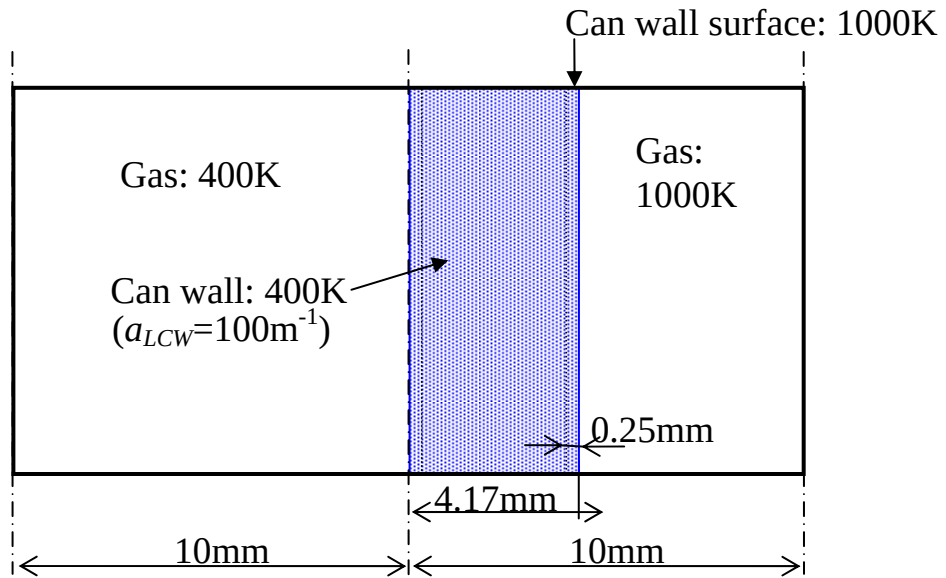


(a) Analytical geometry.

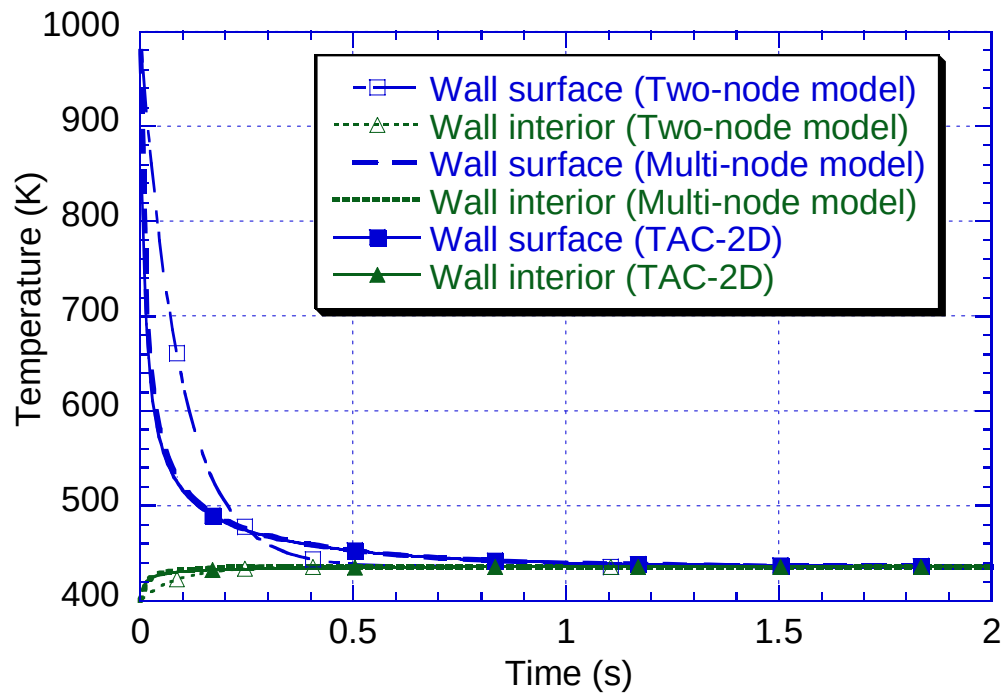


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-5: Thick left can wall coupling with right crust in the adjacent cell using slab geometry (NC6).

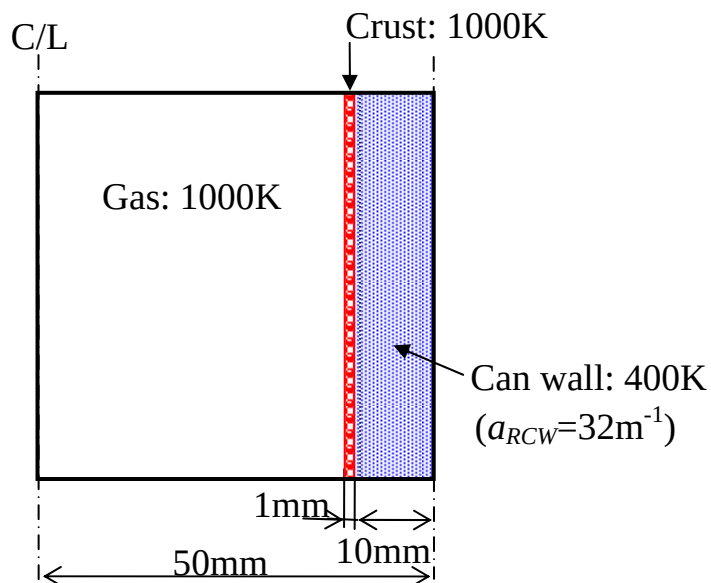


(a) Analytical geometry.

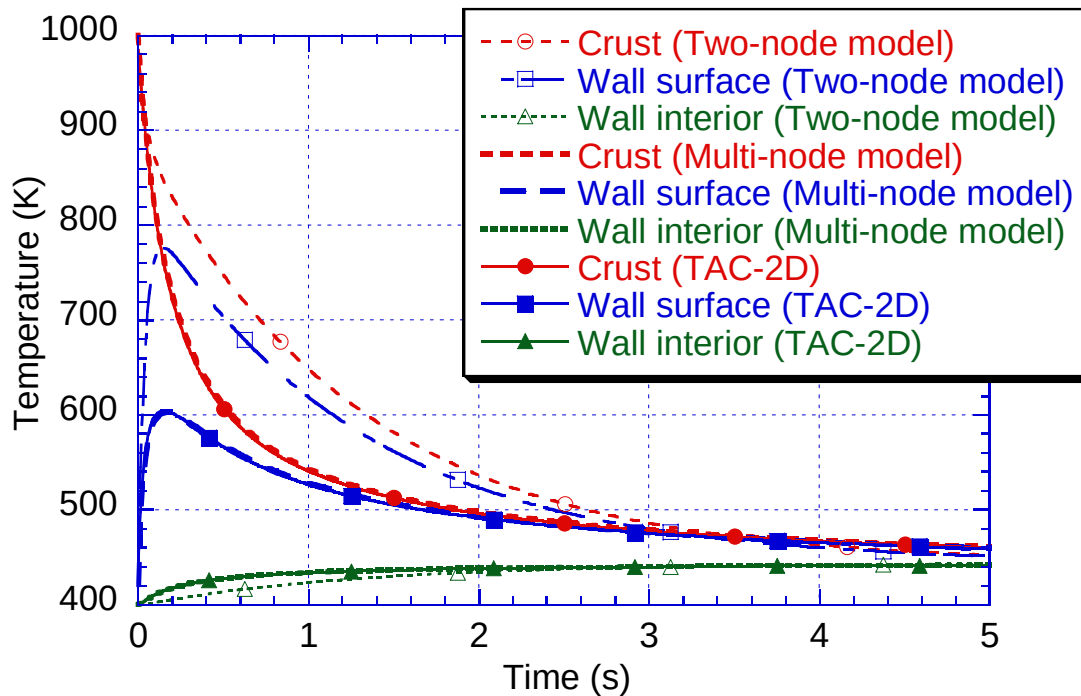


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-6: Thick left can wall coupling with no thick right can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC7).

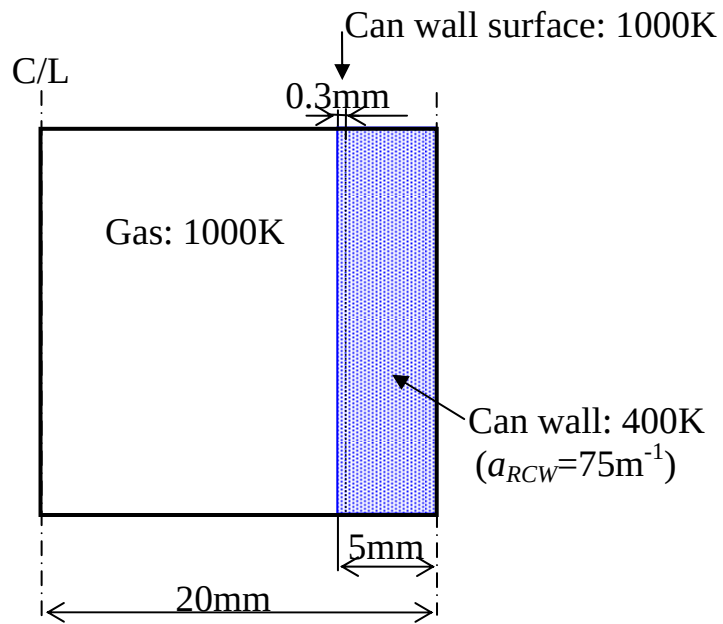


(a) Analytical geometry.

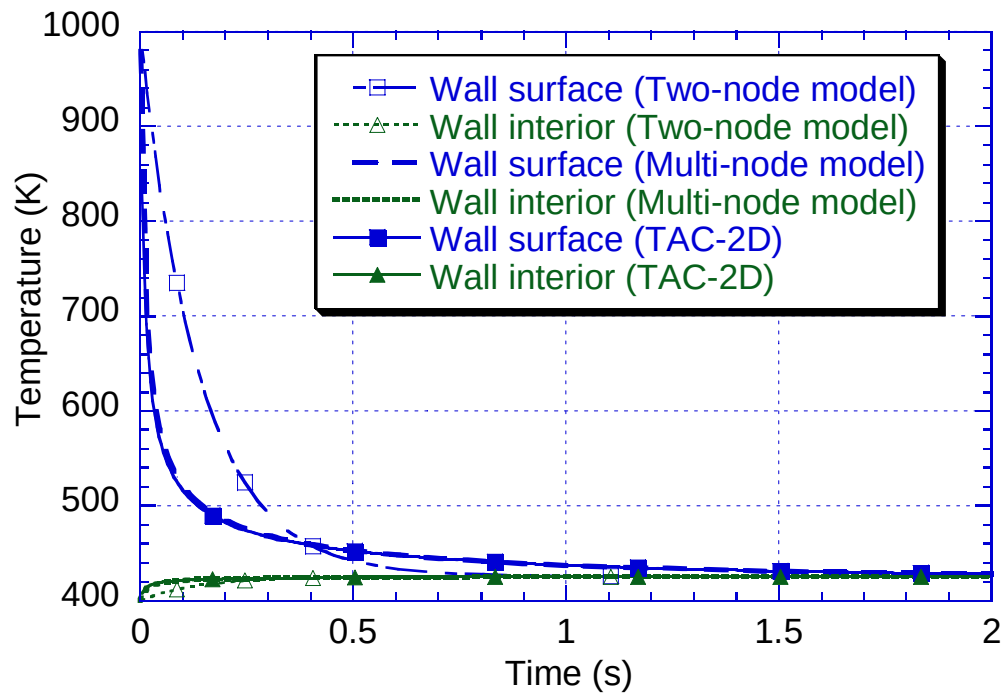


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-7: Crust surrounding thick right can wall coupling with thick left can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC1).

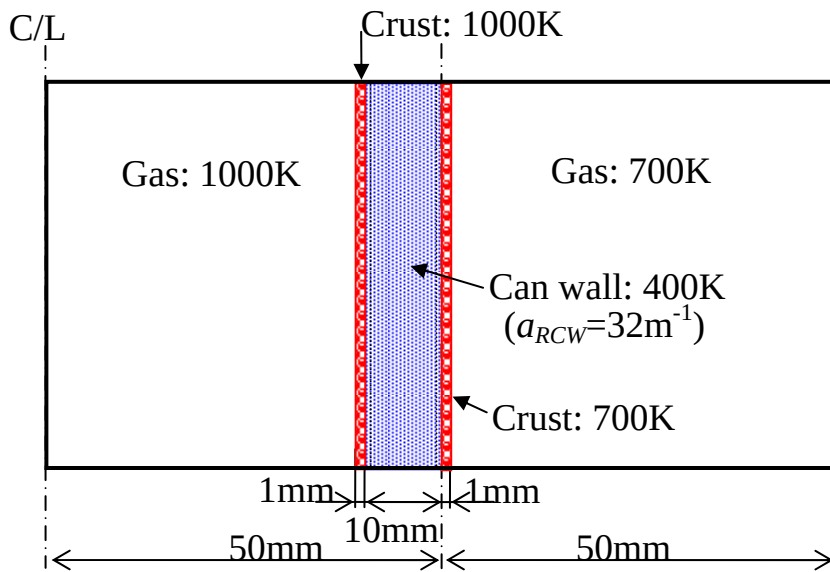


(a) Analytical geometry.

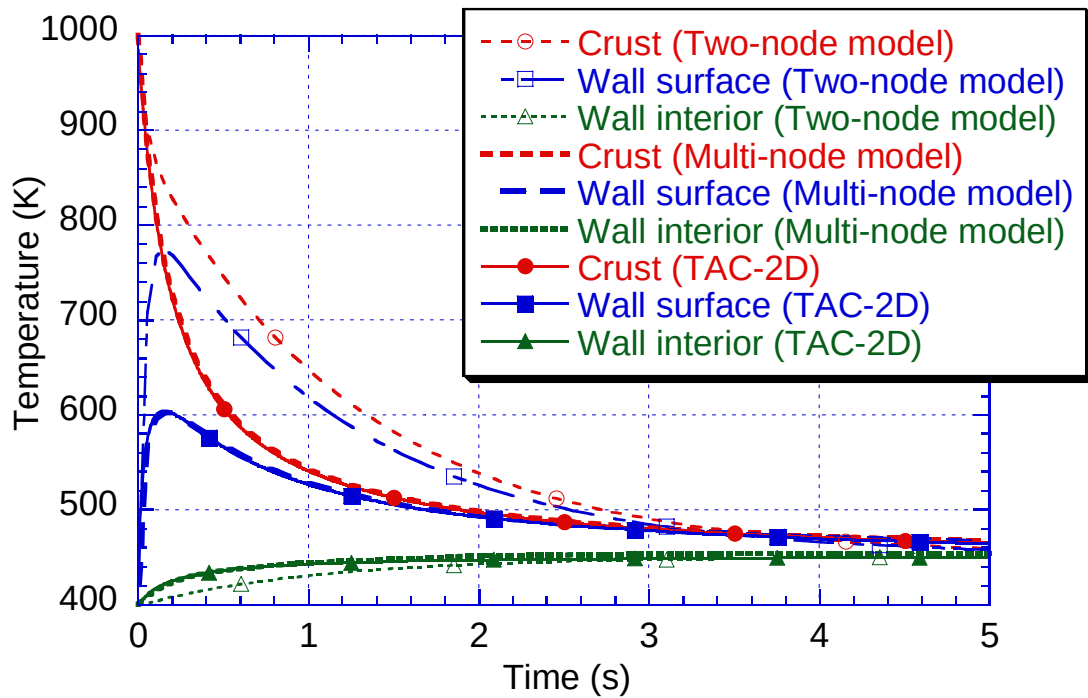


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-8: Thick right can wall coupling with thick left can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC2).

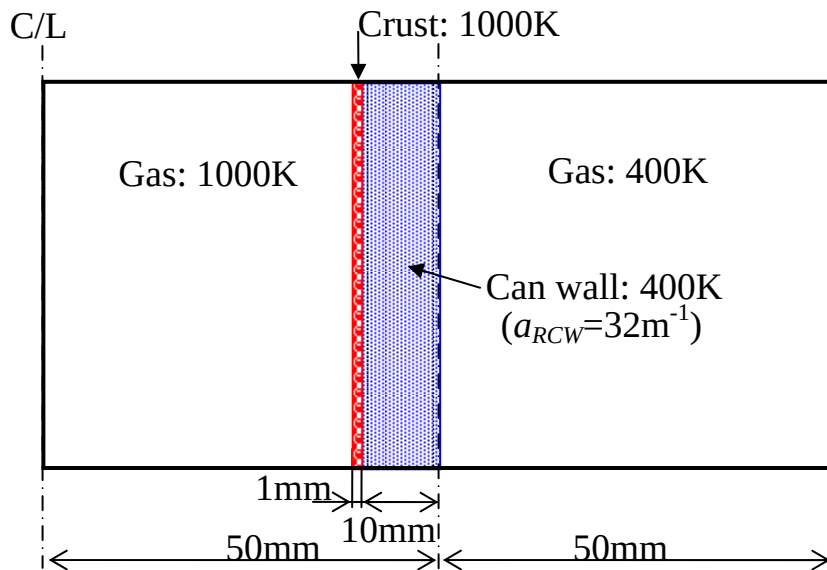


(a) Analytical geometry.

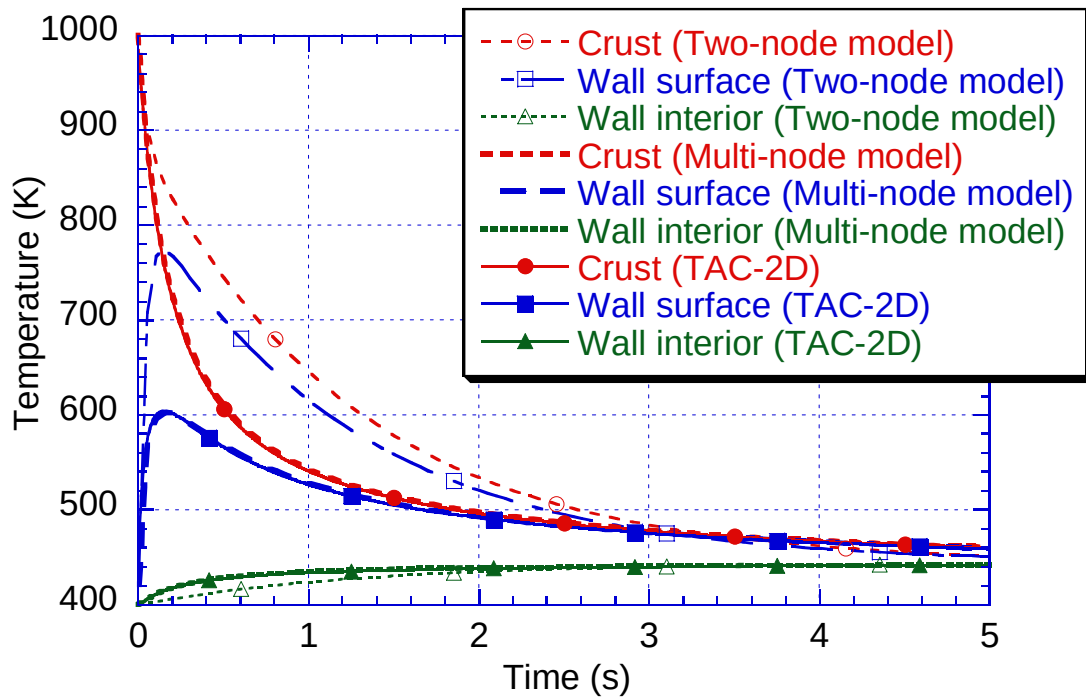


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-9: Crust surrounding thick right can wall coupling with left crust in the adjacent cell using slab geometry (NC4).

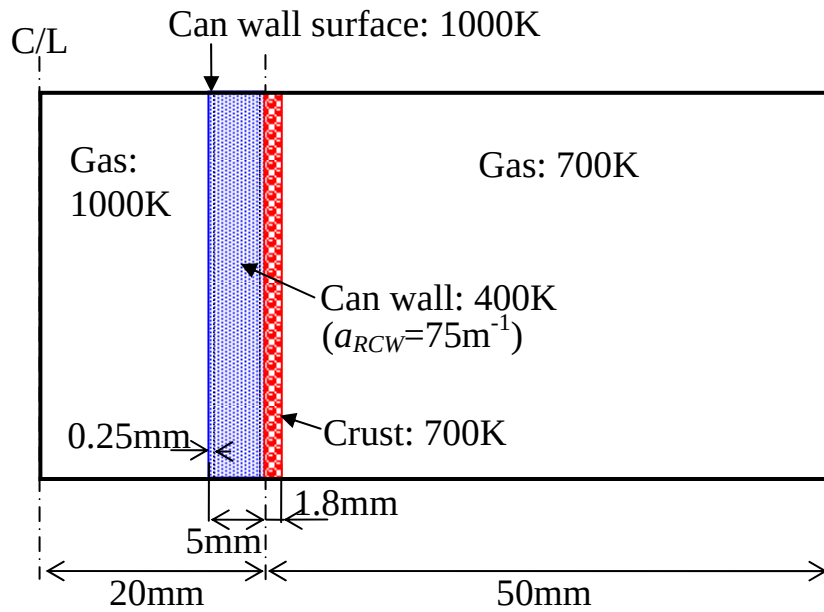


(a) Analytical geometry.

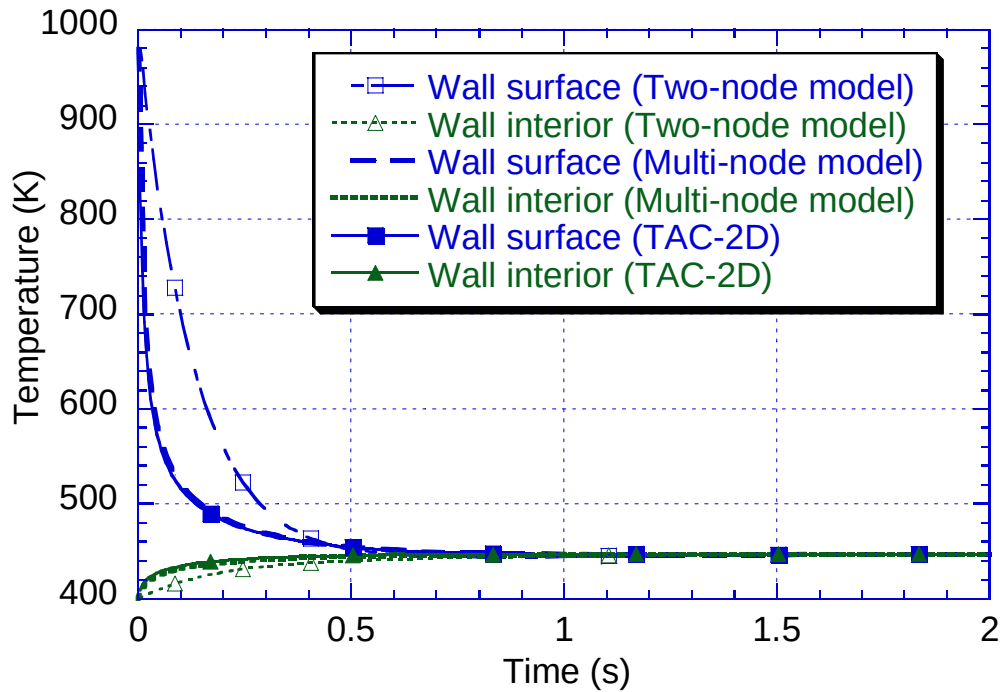


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-10: Crust surrounding thick right can wall coupling with no thick left can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC5).

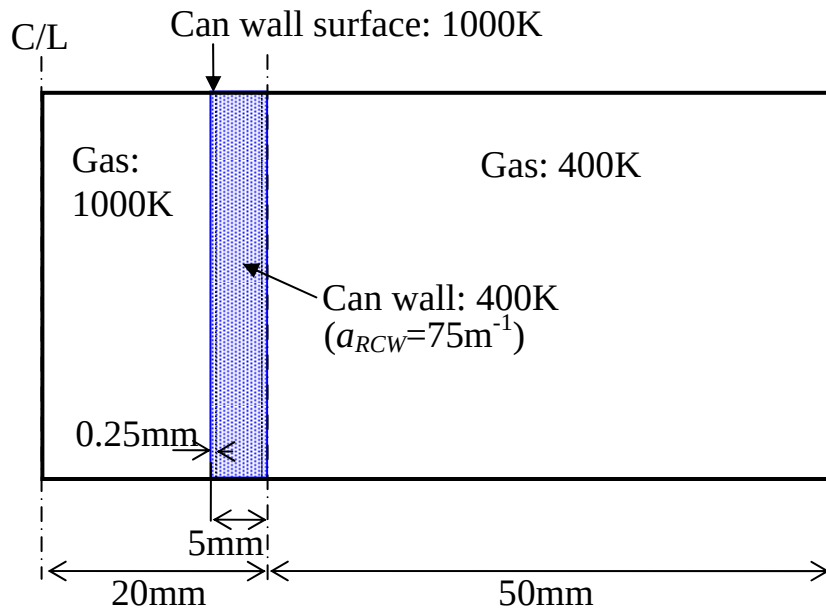


(a) Analytical geometry.

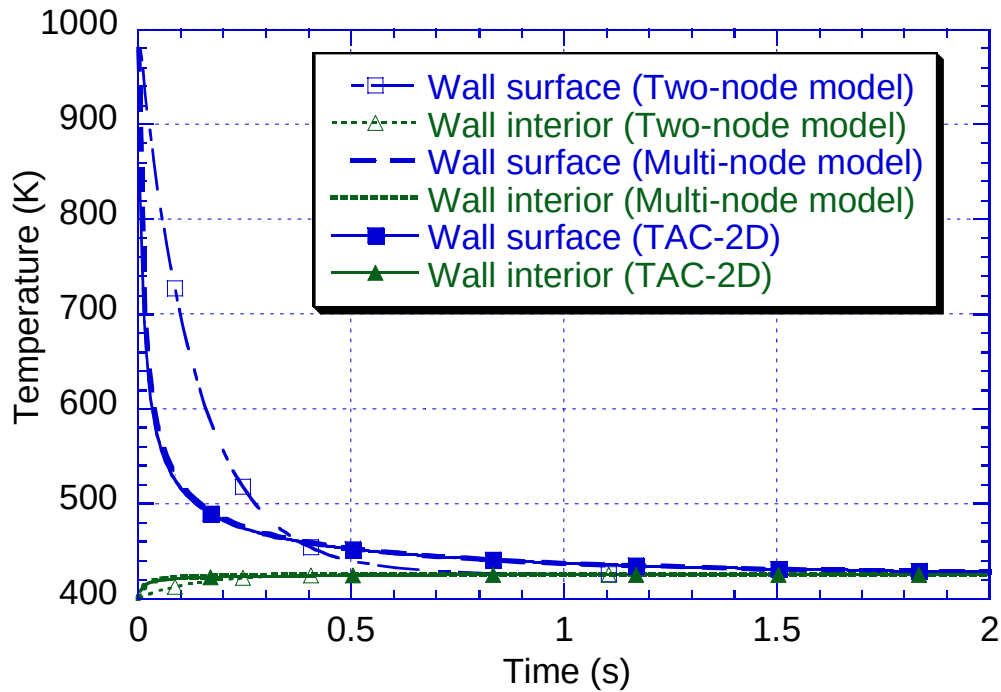


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-11: Thick right can wall coupling with left crust in the adjacent cell using slab geometry (NC6).

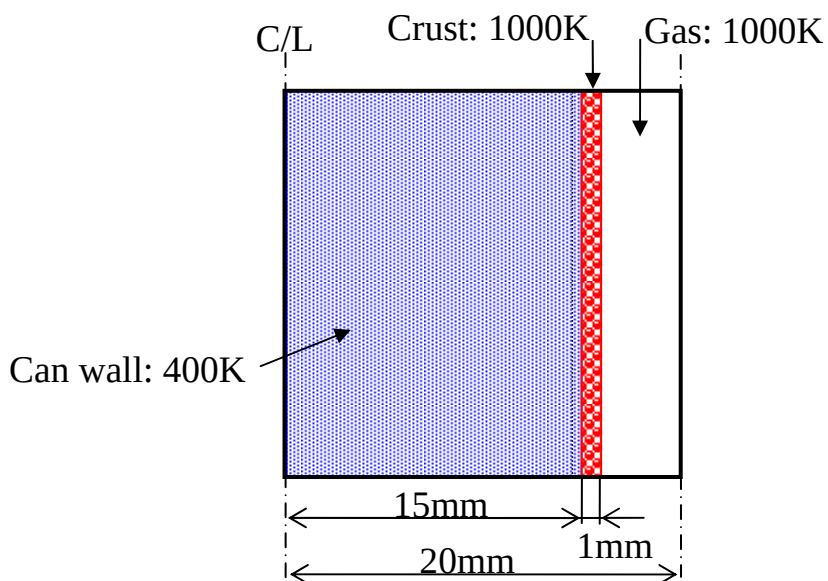


(a) Analytical geometry.

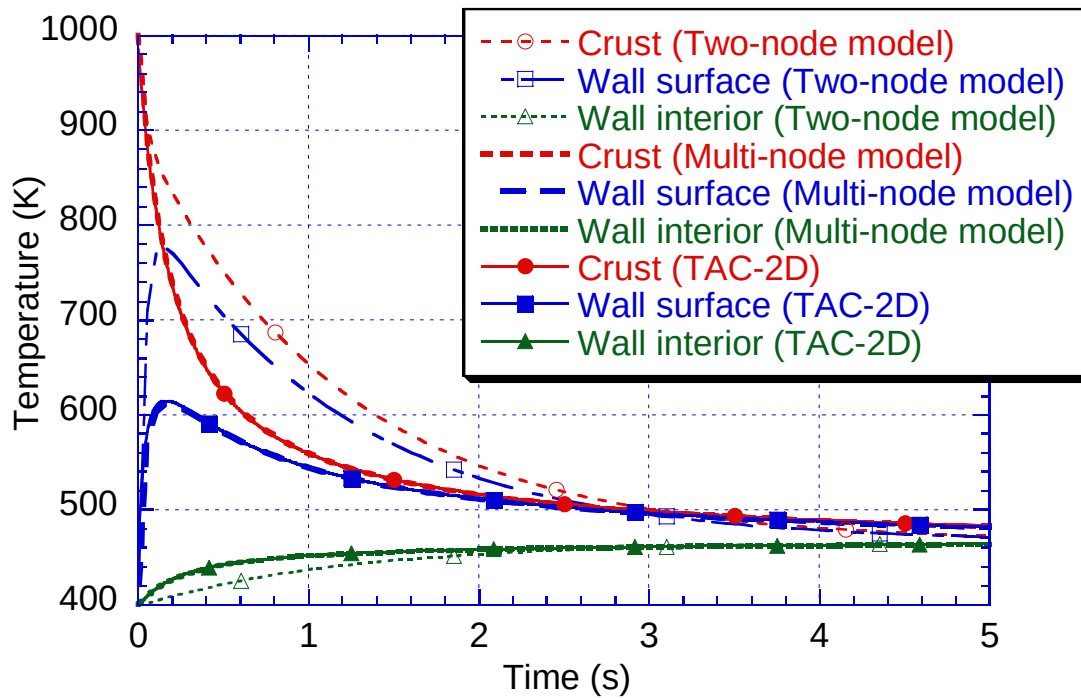


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-12: Thick right can wall coupling with no thick left can wall in the adjacent cell using slab geometry (NC7).

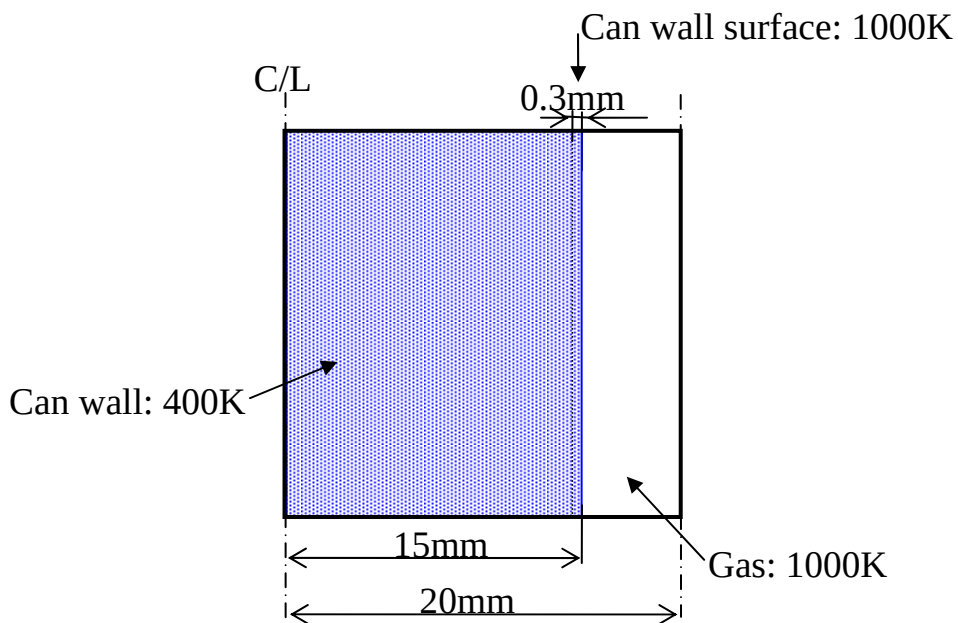


(a) Analytical geometry.

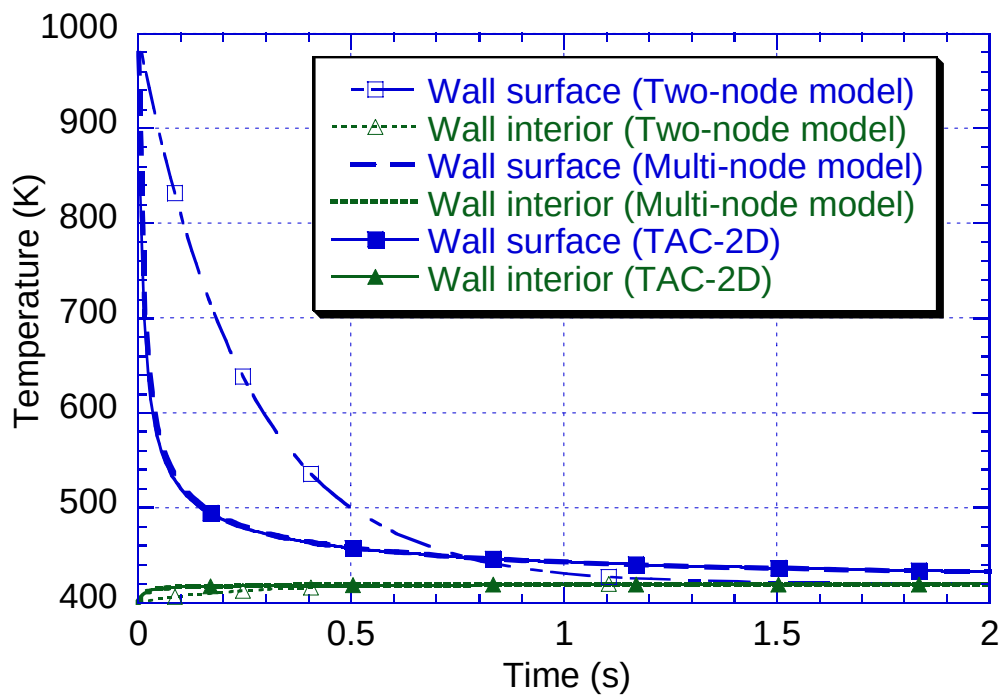


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-13: Crust surrounding thick left can wall coupling with thick right can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC1).

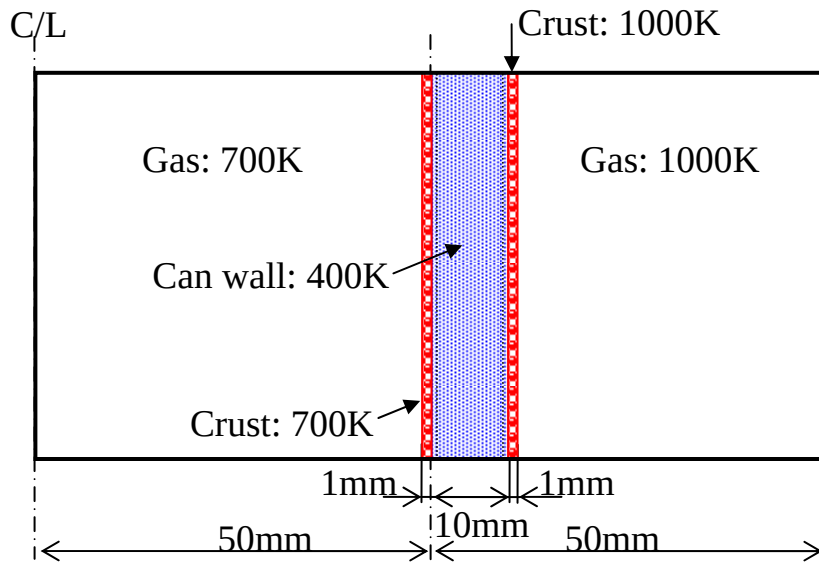


(a) Analytical geometry.

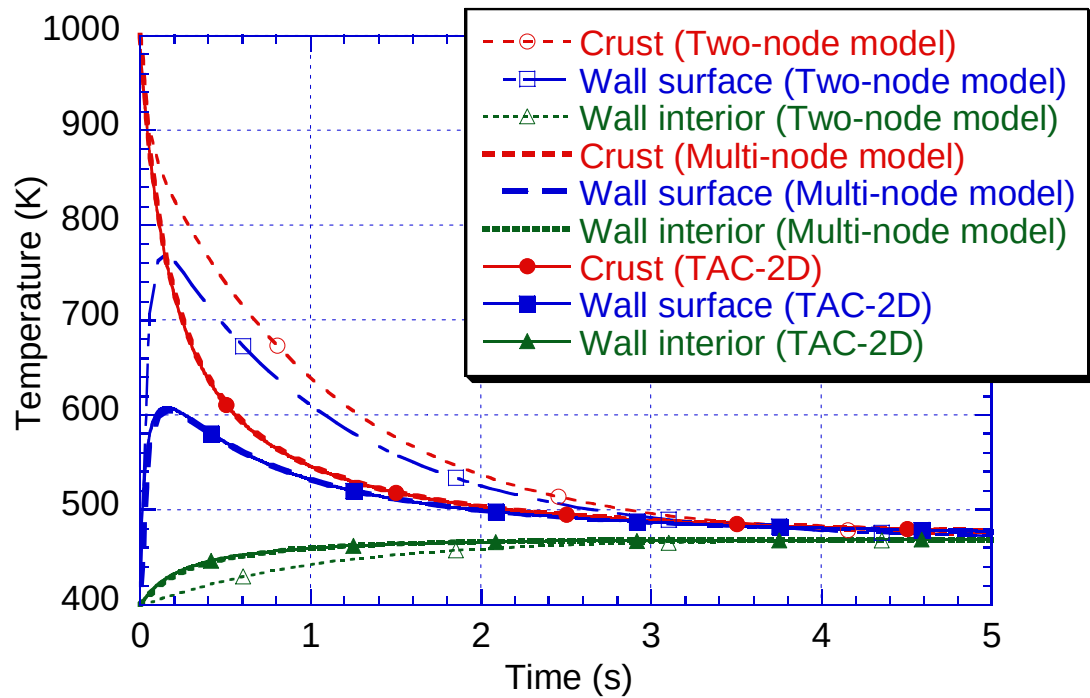


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-14: Thick left can wall coupling with adjacent thick right can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC2).

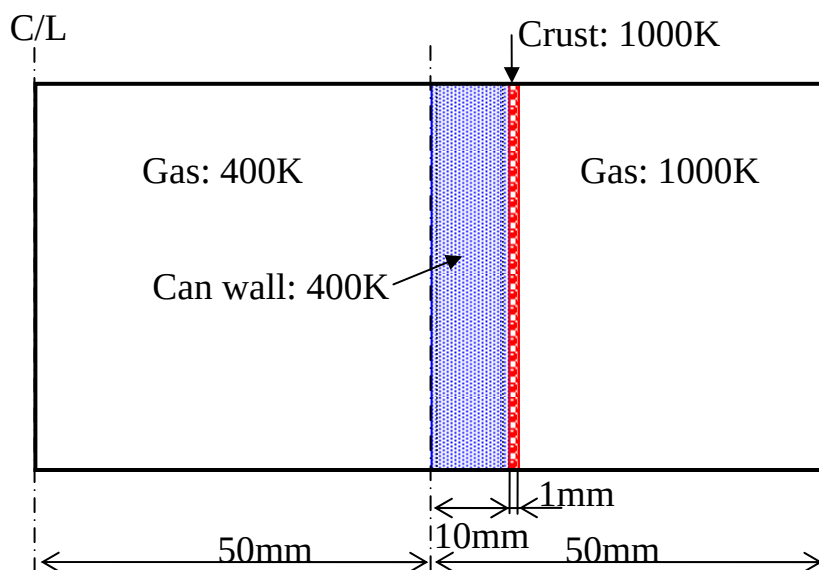


(a) Analytical geometry.

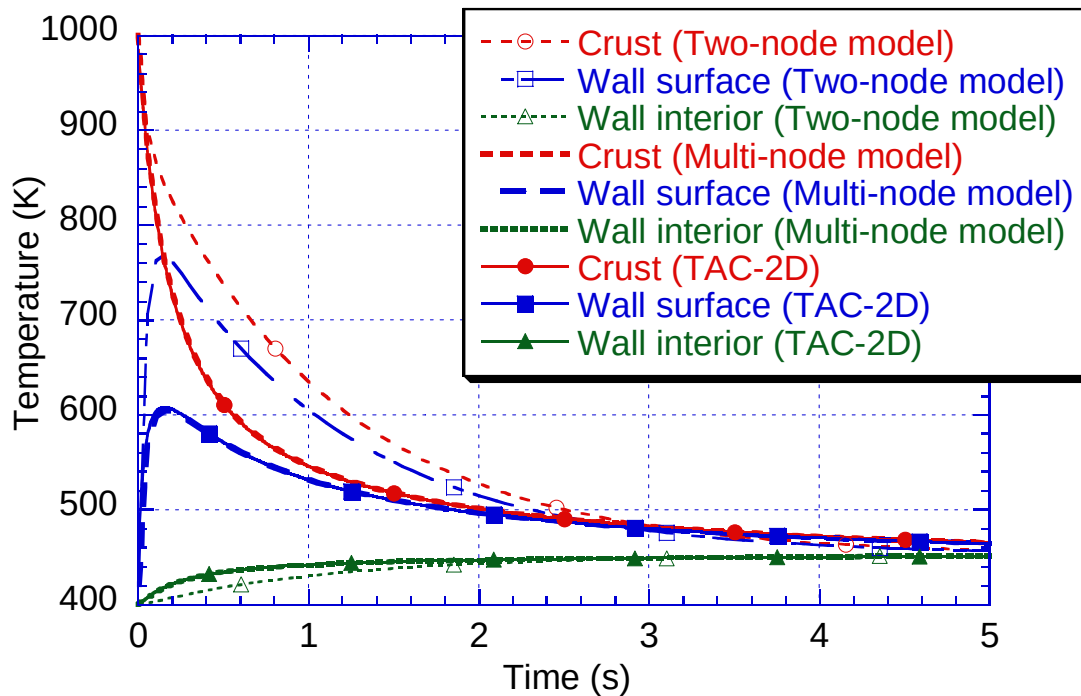


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-15: Crust surrounding thick left can wall coupling with right crust in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC4).

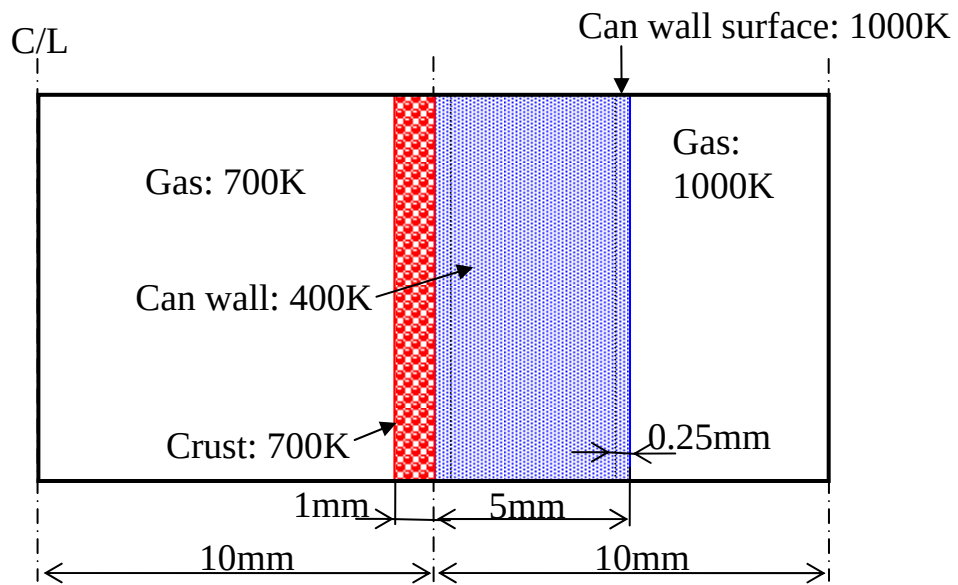


(a) Analytical geometry.

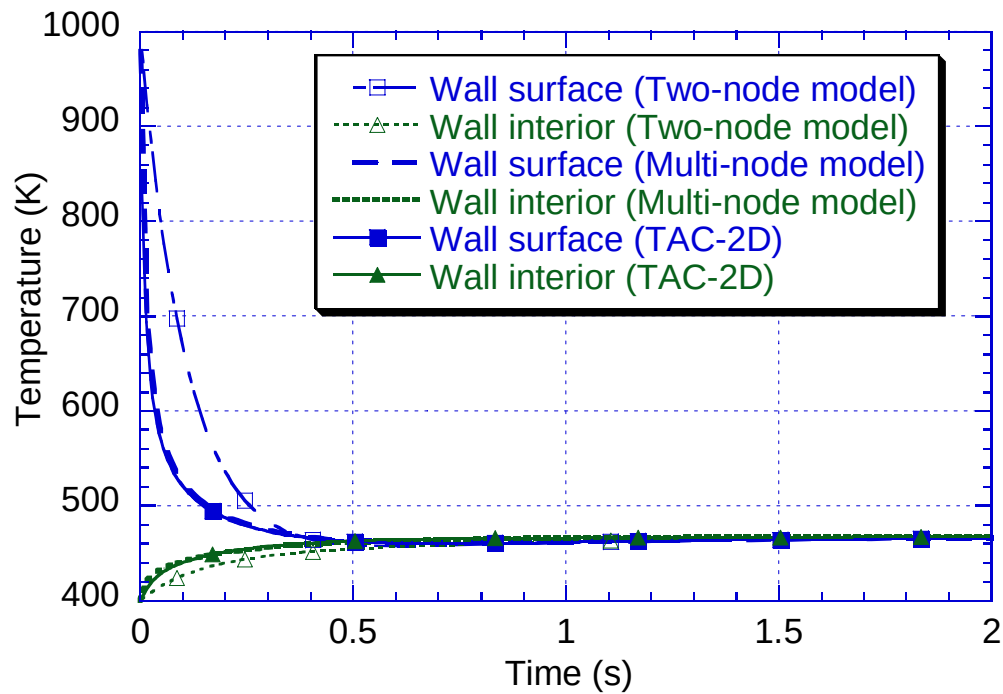


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-16: Crust surrounding thick left can wall coupling with no thick right can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC5).

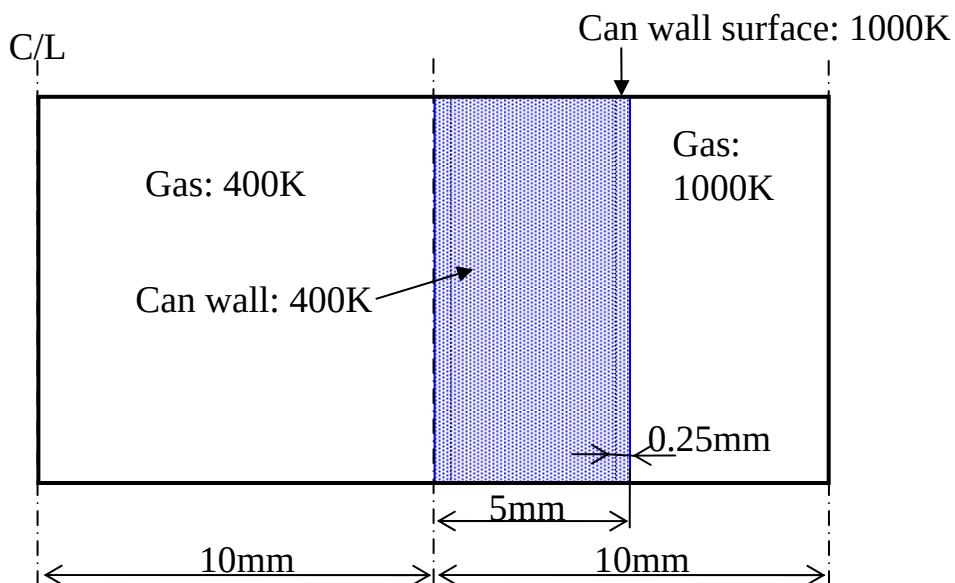


(a) Analytical geometry.

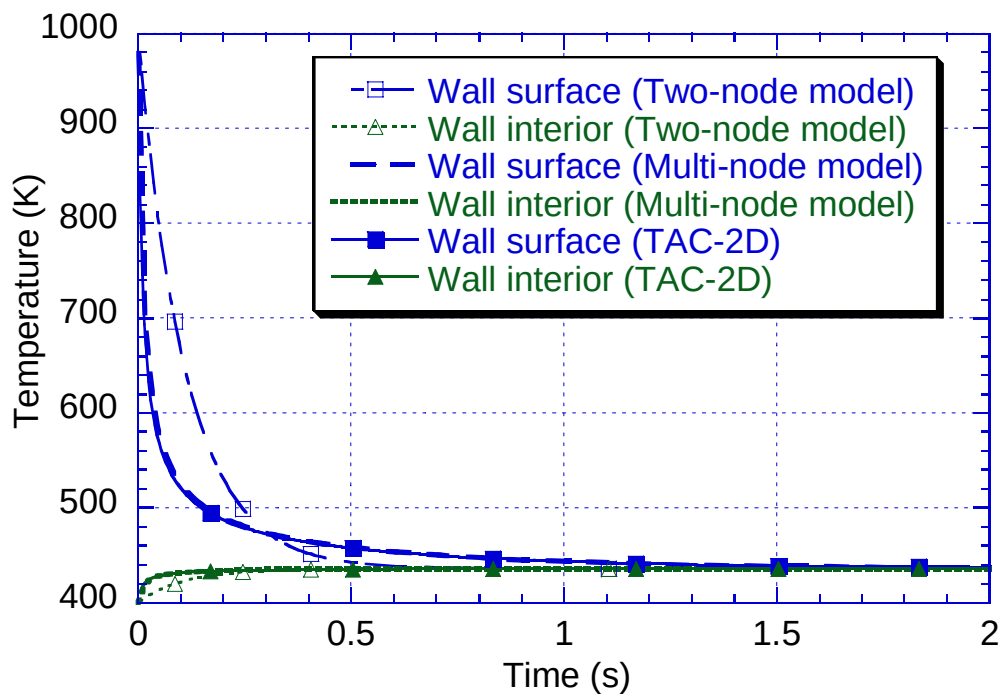


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-17: Thick left can wall coupling with right crust in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC6).

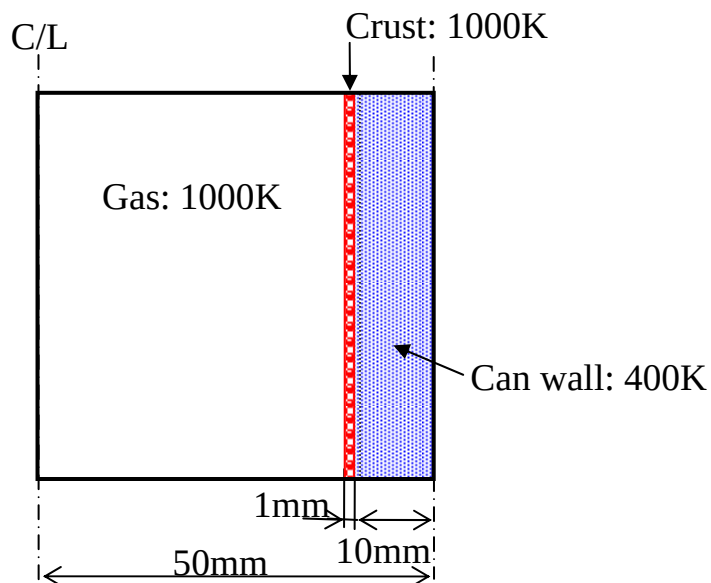


(a) Analytical geometry.

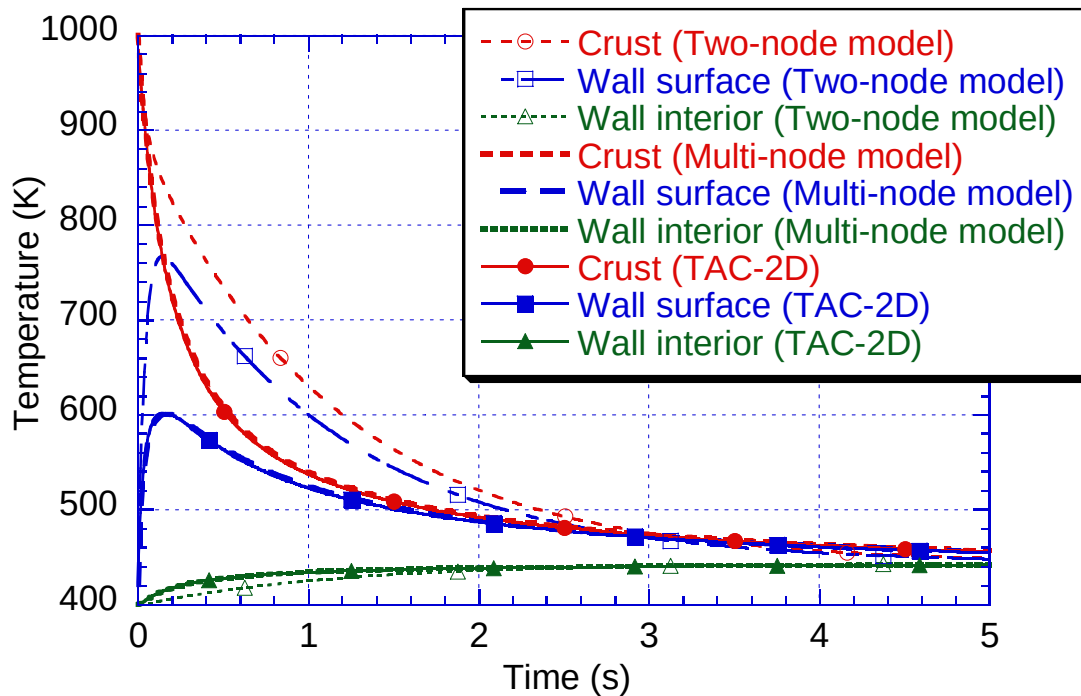


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-18: Thick left can wall coupling with no thick right can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC7).

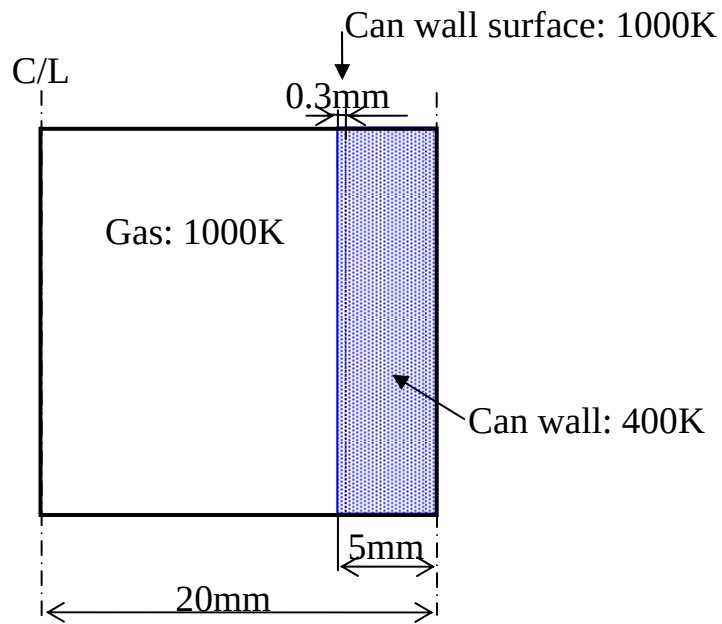


(a) Analytical geometry.

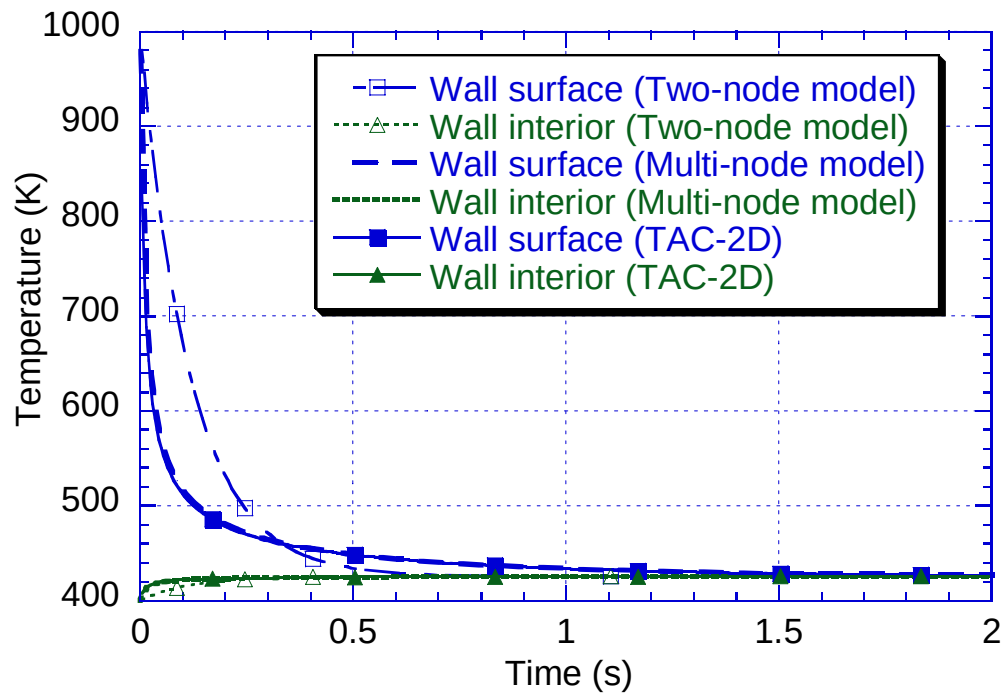


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-19: Crust surrounding thick right can wall coupling with thick left can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC1).

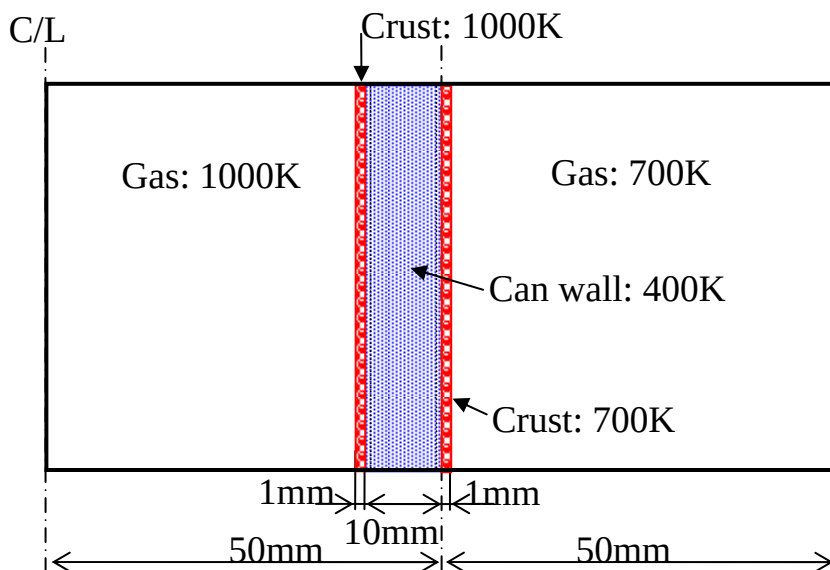


(a) Analytical geometry.

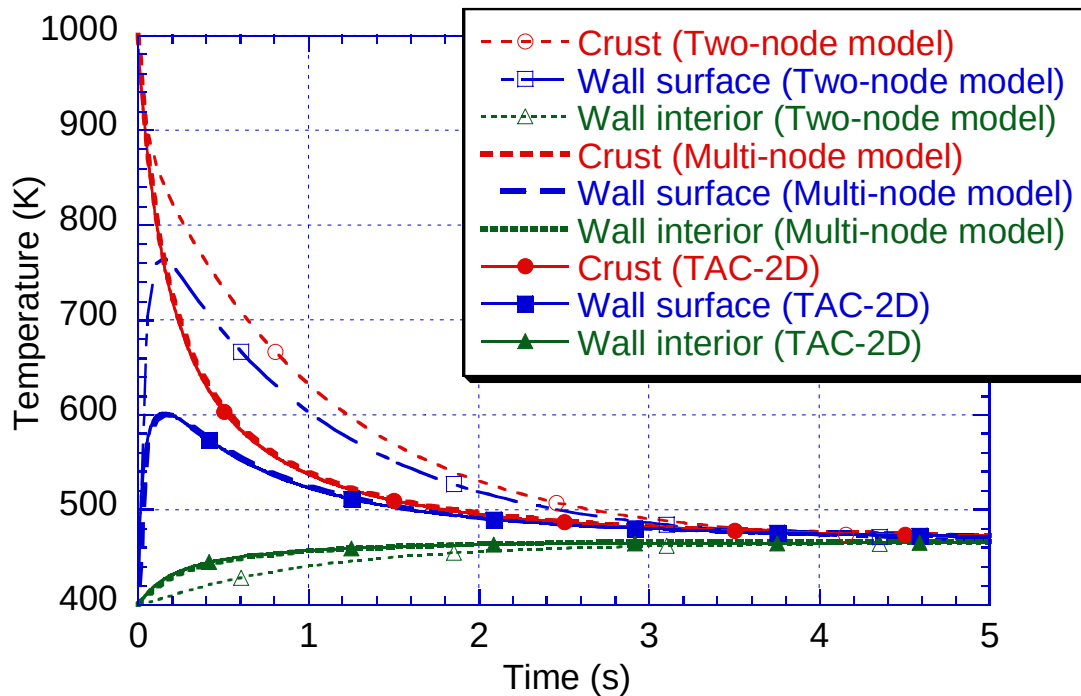


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-20: Thick right can wall coupling with thick left can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC2).

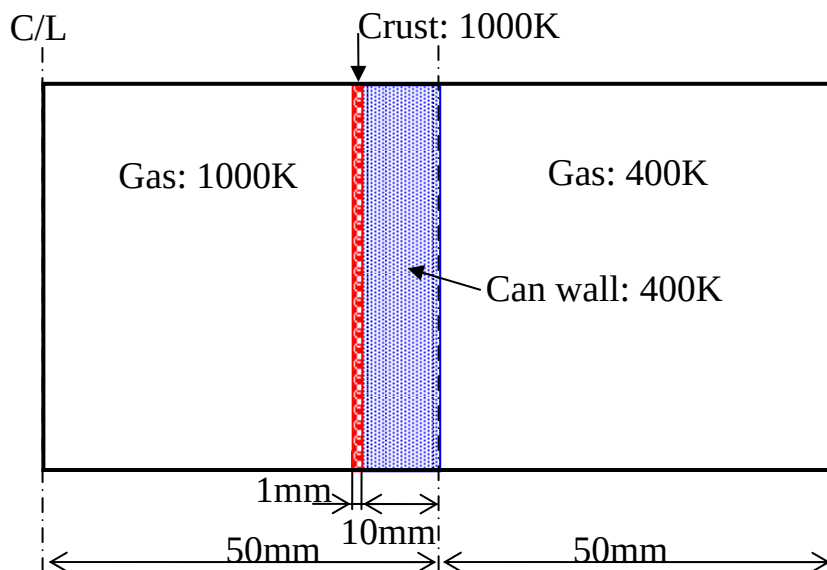


(a) Analytical geometry.

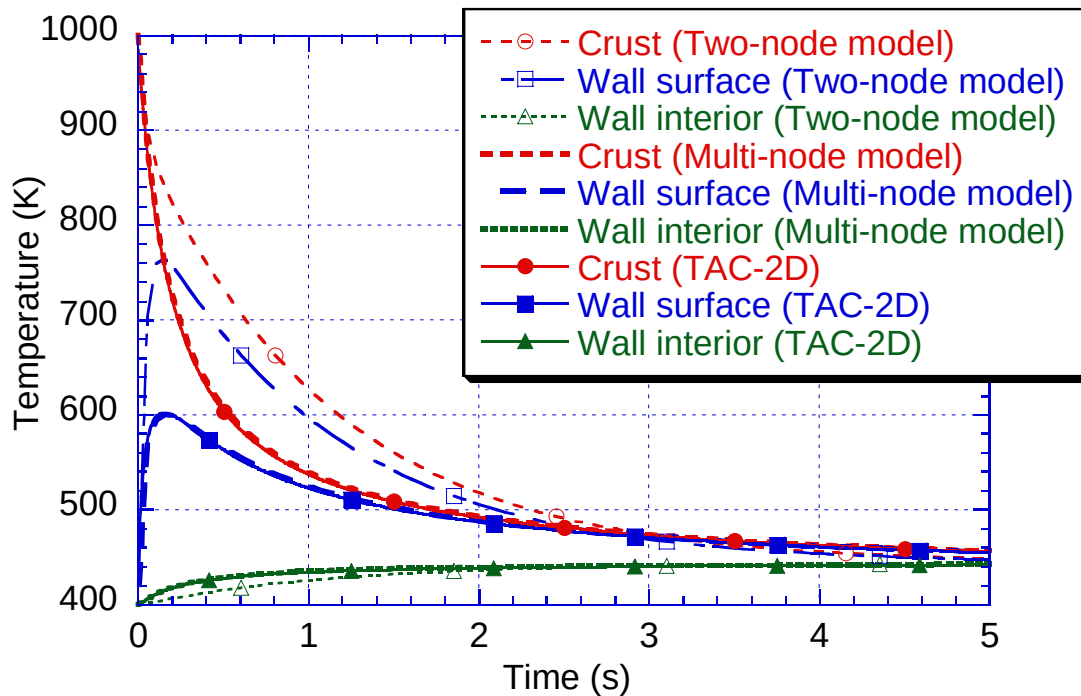


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-21: Crust surrounding thick right can wall coupling with left crust in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC4).

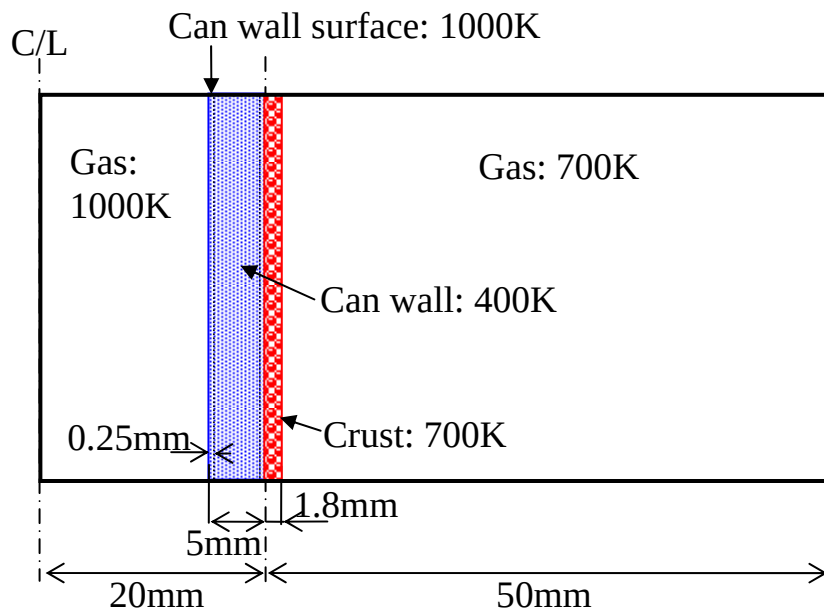


(a) Analytical geometry.

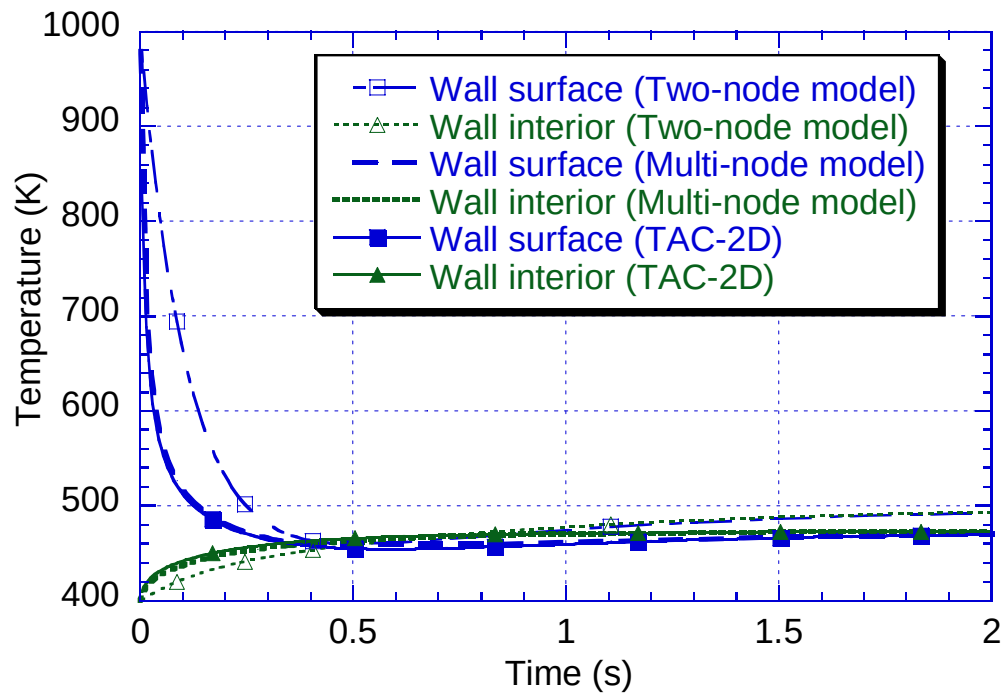


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-22: Crust surrounding thick right can wall coupling with no thick left can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC5).

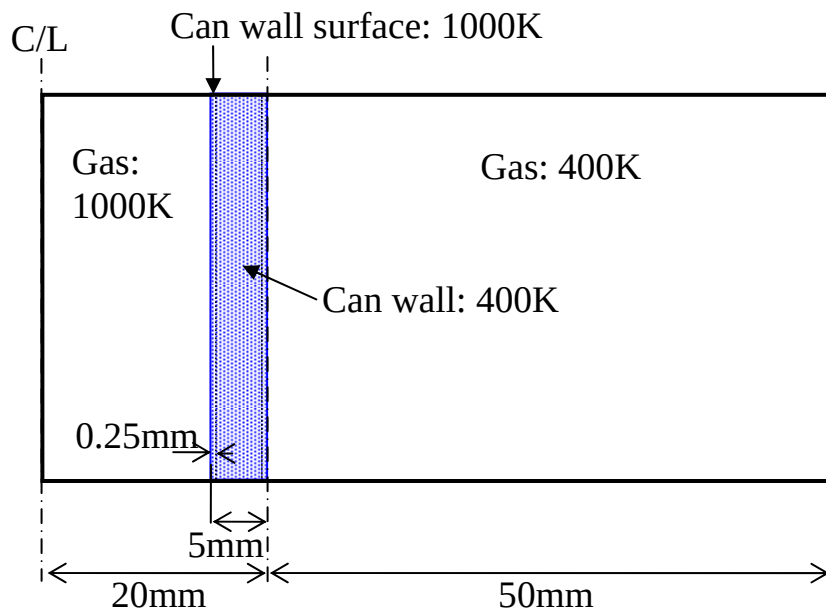


(a) Analytical geometry.

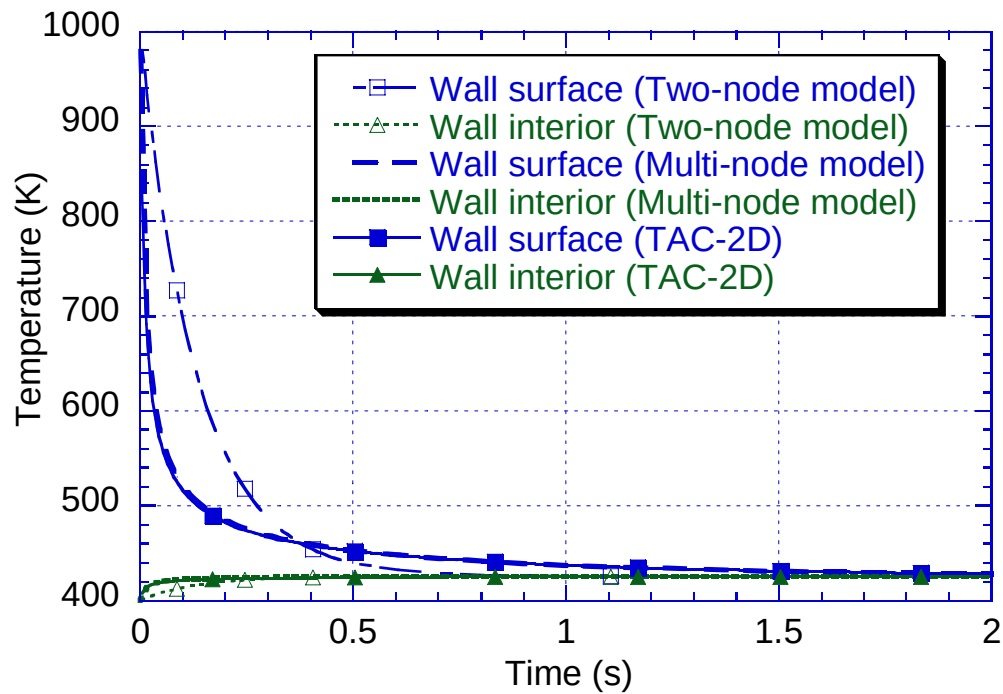


(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-23: Thick right can wall coupling with left crust in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC6).



(a) Analytical geometry.



(b) Calculated temperature histories.

Fig. A-24: Thick right can wall coupling with no thick left can wall in the adjacent cell using cylindrical geometry (NC7).

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光の度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度（質量密度）	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	（数の）	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度 ^(d)	セルシウス度	°C		K
光照射度	ルーメン毎平方メートル	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・cd=m ² ・cd
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときいくつかの用例は表 4 に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度，放射照度	ラジアン毎平方メートル	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量，エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎メートル毎ケルビン	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエンタルギ	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
モルエンタルギ	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg・s ⁻² ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =m ² ・kg・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =kg・s ⁻³

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733 (49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402 (10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691 (30) × 10 ¹¹ m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100fm=10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1 Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=1/(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

